



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PARTICIPACIÓN DE LA INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO  
ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE MARCOS  
CON DISIPADORES DE ENERGÍA HISTERÉTICOS

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

GADIEL MARTÍNEZ GALINDO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LUCIANO ROBERTO FERNÁNDEZ SOLA

MÉXICO, D.F. 2014



*A Beatriz, mi madre, por su apoyo incondicional*

*A Ángeles, mi novia, por darme ánimos y motivos de seguir adelante*

*A Nancy, mi prima, por su gran ejemplo de vida*

## **Agradecimientos**

A mi asesor, el **Dr. Luciano R. Fernández Sola** por su confianza, apoyo y paciencia, en la orientación para realizar este trabajo de investigación.

A mis sinodales la **Dra. Consuelo Gómez Soberón**, y el **Dr. Javier Avilés López** por el apreciado tiempo que dedicaron para la revisión crítica de esta tesis.

A mis **maestros** del Posgrado en Ingeniería Estructural de la UAM-Azc. Por sus valiosos conocimientos y enseñanzas.

A mis **amigos y compañeros** del PIE, por su gran e invaluable amistad.

A la **Universidad Autónoma Metropolitana** por ofrecer en cada una de sus aulas una educación de calidad,

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico que me brindó durante mis estudios de maestría.

Por último y no menos importante quiero expresar mi agradecimiento a dios y mi madre, quienes me dieron la vida; a mi novia y mi familia, quienes directa o indirectamente me impulsaron para lograr esta meta.



## Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS .....	III
ÍNDICE DE TABLAS .....	VI
RESUMEN.....	VII
 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN. ....	 1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivo general.....	3
1.3 Objetivos particulares. ....	3
1.4 Metodología.....	4
1.5 Alcance. ....	4
1.6 Limitaciones.....	5
1.7 Organización de la tesis. ....	5
 CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES.....	 7
2.1 Dispositivo disipador de energía.....	7
2.1.1 Tipos de disipadores de energía .....	9
2.1.2 Aplicaciones.....	13
2.1.3 Normatividad y Reglamentación vigente.....	15
2.1.4 Modelación de estructuras con disipadores de energía.....	16
2.2 Interacción Dinámica Suelo Estructura (IDSE).....	18
2.2.1 Concepto de IDSE y efectos de sitio .....	19
2.2.2 Funciones de impedancia .....	21
2.2.3 Normatividad vigente .....	23
2.2.4 Efectos de la IDSE sobre edificaciones.....	24
2.3 Conceptos de Energía. ....	27
 CAPÍTULO 3 MODELACIÓN Y VALIDACIÓN .....	 29
3.1 Marco, contravientos, disipadores e IDSE.....	29
3.2 Validación del modelado de marcos con disipadores de energía sobre base rígida. .....	31
3.3 Validación del modelado de la IDSE.....	33
3.4 Ejemplo del modelado en OpenSees de un marco de un nivel reforzado con disipadores de energía considerando la IDSE.....	36
3.5 Marco de un nivel concebido inicialmente con disipadores .....	39
3.6 Análisis del marco de un nivel con ruidos blancos.....	40

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DINÁMICO PASO A PASO DE MARCOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA, CONSIDERANDO LA IDSE.....	43
4.1 Descripción del modelo de 10 niveles sin refuerzo y con refuerzo.....	43
4.2 Descripción de la cimentación, suelos de estudio y cálculo de las funciones de impedancia. ....	45
4.3 Marco sujeto a SCT E-W, 1985. ....	50
4.4 Marco sujeto a Viveros N-E, 1985.....	58
4.5 Marco sujeto a ruido blanco. ....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	76

# Índice de Figuras

<i>Figura 1 Medical Center Santa Clara y Hotel Stockton (tomada de Symans et al., 2008)</i> .....	8
<i>Figura 2 a) balance de energía de un sistema sin disipadores de energía y b) balance de energía de un sistema con disipadores de energía</i> .....	9
<i>Figura 3 Dispositivo ADAS (tomada de sirve.cl)</i> .....	10
<i>Figura 4 Dispositivo TADAS (Whittaker et al. 1999).</i> ....	11
<i>Figura 5 Disipadores Taylor en la Torre Mayor de la ciudad de México (tomada de EMRSA)</i> .....	12
<i>Figura 6 Disipador Viscoelástico (Whittaker et al. 1999).</i> ....	12
<i>Figura 7 Ciclos de histéresis a) Disipador por deformación plástica, b) Disipador por fricción, c) Disipador viscoso y d) Disipador Viscoelástico.</i> .....	13
<i>Figura 8 Montados comunes de disipadores de energía, izquierda tipo chevrón y derecha concéntrico</i> .....	17
<i>Figura 9 Curvas fuerza deformación de dispositivos ADAS</i> .....	17
<i>Figura 10 Modelo de propagación de ondas (tomada de Avilés, 2006)</i> .....	21
<i>Figura 11 (a) Distribución del cortante basal en los elementos estructurales y (b) el valor medio absoluto del cortante basal (Carbonari, et al., 2011); SSL: Interacción dinámica suelo estructura y FB base rígida.</i> .....	25
<i>Figura 12 Respuesta estructural considerando los efectos de la IDSE (a) relación periodo amortiguamiento normalizado y relación amortiguamiento compuesto normalizado y (b) y desplazamiento máximo relativo de la pila (tomada de Stehmeyer et al., 2008).</i> .....	26
<i>Figura 13 Respuesta de la estructura base flexible <math>R_{xl}</math> desplazamiento, <math>R_y</math> aceleración y <math>R_{Qb}</math> cortante) <math>\zeta = 1\%</math> (tomada de Wu et al., 1999).</i> .....	27
<i>Figura 14 Material elastoplástico perfecto (Tomada de la librería de OpenSees).</i> .....	30
<i>Figura 15 Elemento twoNodeLink para simular las funciones de impedancia del sistema suelo cimentación (tomada de la librería de OpenSees).</i> .....	30
<i>Figura 16 Marco de 2 Niveles con y sin disipadores de energía</i> .....	31
<i>Figura 17 Aceleración y Espectro de respuesta del centro S-E, 1940.</i> .....	32
<i>Figura 18 Calibración de la respuesta de los modelos M2NSD y M2NCD</i> .....	32
<i>Figura 19 Ciclo histerético del disipador del primer nivel del modelo M2NCD.</i> .....	33
<i>Figura 20 Marco de calibración con IDSE.</i> .....	34
<i>Figura 21 Desplazamientos del modelo de base fija y con IDSE, obtenida con el modelación en OpenSees y la metodología de Wolf (1985).</i> .....	35
<i>Figura 22 Marco de un nivel con y sin disipadores, a) base rígida y b) base flexible.</i> .....	36
<i>Figura 23 Desplazamientos total del marco de 1 nivel sobre base fija y base flexible, sin y con refuerzo</i> .....	37
<i>Figura 24 Desplazamiento relativo de entrepiso de los modelos reparados, sobre base fija y base flexible....</i>	38
<i>Figura 25 Comportamiento histerético del disipador del modelo sobre base fija y base flexible</i> .....	38
<i>Figura 26 Energía de entrada y energía que absorbe el disipador para base fija y base flexible, para el marco de un nivel reforzado.</i> .....	39
<i>Figura 27 Comparación de la respuesta de un marco de un nivel sin refuerzo y un marco de un nivel con disipadores, con periodos de vibrar similares</i> .....	39
<i>Figura 28 Ruido blanco y espectro de Fourier para el marco de 1 nivel</i> .....	40
<i>Figura 29 Desplazamiento total del marco de 1 nivel sobre base fija y base flexible, sin y con refuerzo, sometido a un ruido blanco.</i> .....	41



Figura 30 Desplazamiento relativo de entrepiso de los modelos reparados, sobre base fija y base flexible, sometidos a ruido blanco. ....	42
Figura 31 Ciclos histeréticos del disipador del marco de un nivel sobre base fija y base flexible, sometidos a ruido blanco. ....	42
Figura 32 Edificio de concreto propuesto en el manual de obras civiles de la CFE del 93 .....	43
Figura 33 Marco de 10 niveles sin refuerzo y Marco de 10 niveles con refuerzo (MSR y MCR).....	44
Figura 34 Funciones de impedancia para $V_s = 69 \frac{m}{s}$ .....	47
Figura 35 Funciones de impedancia para $V_s = 100 \frac{m}{s}$ .....	47
Figura 36 Funciones de impedancia para $V_s = 250 \frac{m}{s}$ .....	48
Figura 37 Funciones de impedancia para $V_s = 400 \frac{m}{s}$ .....	48
Figura 38 Marcos de 10 niveles con y sin refuerzo, sobre base rígida y base flexible. ....	49
Figura 39 Registro y Espectro escalado de la estación SCT-85 .....	50
Figura 40 Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).....	52
Figura 41 Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).....	52
Figura 42 Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).....	53
Figura 43 Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (SCT-85). ....	53
Figura 44 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (SCT-85).....	54
Figura 45 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (SCT-85).....	54
Figura 46 Ciclos histeréticos del disipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85). ....	55
Figura 47 Ciclos histeréticos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85). ....	55
Figura 48 Ciclos histeréticos del disipador del último nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85). ....	56
Figura 49 Energía de entrada del sismo y energía que absorben los disipadores del marco (SCT-85).....	56
Figura 50 Porcentaje energía que absorben los disipadores del marco (SCT-85). ....	57
Figura 51 Perfil de disipación de energía por entrepiso (SCT-85). ....	58
Figura 52 Registro y Espectro escalado de la estación Viveros-85 .....	58
Figura 53 Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).....	59
Figura 54 Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).....	60
Figura 55 Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).....	60
Figura 56 Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (Vivero-85). ....	61
Figura 57 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (Vivero-85). ....	61
Figura 58 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (Vivero-85). ....	62
Figura 59 Ciclos histeréticos del disipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85). ....	62

<i>Figura 60 Ciclos histeréticos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85).</i>	63
<i>Figura 61 Ciclos histeréticos del disipador del último nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85).</i>	63
<i>Figura 62 Energía de entrada del registro de Viveros-85 y energía que absorben los disipadores del marco.</i>	64
<i>Figura 63 Porcentaje energía que absorben los disipadores del marco (Viveros-85).</i>	65
<i>Figura 64 Perfil de disipación de energía por entrepiso (Viveros-85).</i>	66
<i>Figura 65 Ruido blanco y espectro de Fourier para los modelos de 10 niveles.</i>	66
<i>Figura 66 Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).</i>	67
<i>Figura 67 Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).</i>	68
<i>Figura 68 Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).</i>	68
<i>Figura 69 Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco).</i>	69
<i>Figura 70 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco).</i>	69
<i>Figura 71 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco).</i>	70
<i>Figura 72 Ciclos histeréticos del disipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).</i>	71
<i>Figura 73 Ciclos histeréticos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).</i>	71
<i>Figura 74 Ciclos histeréticos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).</i>	72

# Índice de Tablas

<i>Tabla I Aplicaciones de dispositivos disipadores de energía a edificios (Tena, 2003 y Symans, 2008).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla II Periodos de los modelos M2NSD y M2NCD.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla III Rigideces del sistema suelo cimentación del Marco de 1 nivel .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla IV Dimensiones de columnas de entrepiso y Área de contravientos.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla V Fuerzas de fluencia para los dispositivos disipadores de energía.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla VI Propiedades de los suelos en estudio .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla VII Valores de Rigideces horizontal y rotacional para los distintos suelos y modelos.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla VIII Amortiguamiento de los distintos suelos y grados de libertad y amortiguamiento equivalente .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla IX Periodos del marco de 10 niveles .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla X Porcentaje reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (SCT-85). .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla XI Porcentaje reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (Viveros).....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla XII Porcentaje reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (Ruido blanco).....</i>	<i>67</i>

# Resumen.

En la actualidad gran parte de las ciudades del mundo se encuentran vulnerables a los desastres naturales. Entre ellos los más notorios son los terremotos que han sido motivo de múltiples investigaciones, debido al impacto y a los efectos que éstos generan a las obras civiles de una sociedad. Este problema toma bastante relevancia en la ciudad de México por la ubicación geográfica combinada con las características del subsuelo sobre el cual la ciudad está fundada.

La necesidad del ser humano de estar seguro bajo la incidencia de un terremoto, ha dado lugar a bastantes estudios sobre el comportamiento de estructuras sometidas a aceleraciones en su base. Como resultado, esto ha dado origen a nuevas técnicas para controlar la respuesta del sistema, con el objetivo de disminuir los enormes daños que se presentan en las estructuras sujetas a acciones sísmicas.

Las técnicas de control de la respuesta sísmica han venido en auge las últimas décadas. Se han implementado en varias construcciones de México y el mundo, aunque el estudio de estas técnicas es muy joven en el país, ha evolucionado de una manera impresionante, debido a lo atractivo que suena diseñar edificios con este tipo de técnicas de control. Las más conocidas son la implementación de disipadores de energía a la estructura, aislamiento sísmico en la base e implementación de un sistema de masa de control. En este trabajo solo se analizó el comportamiento de marcos reforzados con disipadores de energía.

Es lógico que nuevas técnicas de control de la respuesta de las estructuras generen mayores inversiones en cuanto a su construcción. Por ello es de gran importancia que se consideren las principales variables que intervienen para realizar en lo posible un buen diseño de la estructura con disipadores de energía.

Una variable importante a tomar en cuenta en el diseño de edificaciones es la que está ligada con el suelo. La forma común de estudiar este factor es considerando la interacción dinámica suelo estructura (IDSE). Es bien sabido que el subsuelo blando de la zona centro de la ciudad de México genera una amplificación de ondas respecto a la de un suelo firme, lo cual puede generar mayores exigencias y demandas a la estructura.

Debido a la importancia del suelo de desplante es necesario determinar mediante un análisis dinámico el efecto de la interacción dinámica suelo estructura en la respuesta de marcos con disipadores de energía.

Para llevar a cabo esto, se modeló un marco de diez niveles reforzado con disipadores de energía histeréticos. Se propuso un cajón de cimentación desplantado sobre cuatro distintos tipos de suelo. Se usará también la condición de base fija que sirva como referencia para

obtener el efecto de la IDSE sobre la respuesta de la estructura y sobre la respuesta del disipador. En la modelación se consideró, que la rigidez dinámica del sistema suelo cimentación de un marco bidimensional, es la parte proporcional de la rigidez de un cajón de cimentación de una estructura tridimensional. La proporción se tomó en cuenta dividiendo el valor de la rigidez dinámica del sistema suelo cajón de cimentación, entre el número de marcos resistentes a cortante, suponiendo que el cortante en la base actúa de manera uniforme en los marcos.

Se usaron dos registros de sismo para excitar a la estructura correspondiente a STC E-W, 1985 y Viveros N-E, 1985. También se usó un ruido blanco con la finalidad de que el cambio en el nivel de aceleración no afecte la respuesta de la estructura.

Como muchas veces los disipadores son usados como refuerzo de una estructura, se obtuvo la eficiencia del sistema de refuerzo (contraviento-disipador) para los distintos niveles de flexibilidad del suelo.

Se calculó la eficiencia del sistema de disipación considerando la IDSE, así también se demuestra cómo afecta la IDSE en la efectividad de cada disipador de entrepiso.

.

# Capítulo 1 Introducción.

## 1.1 Planteamiento del problema.

El diseño convencional de estructuras desplantadas en regiones vulnerables a terremotos ha despertado inquietudes a los ingenieros e investigadores estructurales, con base a la ocurrencia en las últimas décadas de sismos de gran magnitud y a los registros de las respuestas que las edificaciones desarrollan ante estos eventos. Se ha observado que gran parte de los edificios son solicitados a responder fuera de su comportamiento elástico y por ende aceptar deformaciones permanentes y daños en ciertos elementos estructurales. Este comportamiento es de esperarse ya que la normatividad y la práctica constructiva vigente lo permiten, refiriéndose a este efecto como un comportamiento dúctil de la estructura.

La ductilidad y el comportamiento plástico se relacionan con el daño relativo que sufre la estructura, este daño ha sido controlado y aislado en ciertos elementos para evitar el colapso súbito del edificio durante la ocurrencia de un sismo. En un sistema estructural a base de marcos resistentes a sismo, las vigas son los elementos estructurales donde se pretende se presente en primera instancia un comportamiento inelástico, a esta filosofía de diseño se le conoce como viga débil columna fuerte.

Si bien una gran ventaja de esta filosofía de diseño es que evita un colapso súbito de la estructura, muchas veces el daño alcanzado por los elementos sismoresistentes es severo, daño que es suficiente justificación para que la estructura se considere insegura o fuera de servicio. Desde un punto de vista económico esto resulta fatal, ya que las pérdidas por el cierre de una estructura son muy altas. Desde un punto de vista social esto desemboca en un gran problema, ya que si la estructura es del tipo primordial, ya sea centros de salud, oficinas gubernamentales, etc., el desarrollo de la vida después de la ocurrencia del sismo, se vuelve crítico, por ejemplo un hospital, debe de permanecer en operaciones durante y después del terremoto para atender al sector de la población que pudiese verse afectada por el evento natural.

Debido a este problema, se han desarrollado nuevas técnicas de diseño que permitan un comportamiento plástico en ciertos elementos, para absorber grandes deformaciones plásticas, que se refleje en un daño global pequeño en los componentes estructurales, para garantizar la funcionalidad de la estructura después de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, a estas técnicas se les llama sistema de control de respuesta (Symans *et al.*, 2008).

Los sistemas de control de la respuesta se basan en implementar en puntos estratégicos dispositivos a la estructura, con la finalidad de adicionar amortiguamiento o rigidez o masa

al sistema dinámico, para tener un comportamiento más favorable y sobre todo controlado del edificio.

Los disipadores de energía histeréticos, son un ejemplo de sistemas de control de la respuesta, estos dispositivos disipan energía a través de ciclos de histéresis. La filosofía de diseño de estos sistemas de control se basa en disipar energía a una cierta deformación, así el dispositivo fluye, mientras que los demás componentes estructurales (vigas y columnas) tienen un comportamiento elástico, cuando el edificio se somete a aceleraciones en su base.

Al tener nuevas técnicas de diseño el ingeniero tiene que tomar en cuenta las variables para las cuales estas técnicas son eficientes y en cuales situaciones estas metodologías no son tan favorables.

Una variable que ha sido motivo de investigaciones dirigidas a entender el comportamiento de estructuras ante una excitación en su base es, la influencia de la flexibilidad del suelo de desplante en la respuesta de la estructura, que se refleja en un comportamiento distinto para cada estratigrafía de suelo. Por ello en análisis dinámicos de estructuras, la zona y el tipo de suelo sobre el que el edificio será construido es importante.

Como es bien sabido la naturaleza del suelo en algunos casos hace difícil la construcción de edificaciones de cualquier tipo, claro ejemplo es el suelo de la ciudad de México. Revisando la historia, la ciudad está fundada sobre una zona lacustre, que complica la edificación en esta región, principalmente por que el subsuelo posee un gran porcentaje de contenido de agua, propiedad que hace susceptible al suelo a la compresión. Además si a esta problemática le sumamos que México es un país de alta sismicidad, la contribución del efecto del suelo a la respuesta de la estructura ante este fenómeno se vuelve aún más importante, ya que es conocido que el suelo de la ciudad tiene un efecto de sitio de amplificación de las sollicitaciones dinámicas y un efecto de IDSE debido a la deformación del suelo.

Diversos estudios sobre el comportamiento de estructuras toman en cuenta los efectos del suelo y llaman a este problema, efectos de interacción dinámica suelo estructura (IDSE), concepto que más adelante se define ampliamente.

Se ha observado que la IDSE tiene impacto en el problema dinámico, modificando parámetros de la respuesta estructural que son considerados en la normatividad vigente, como son, el alargamiento del periodo fundamental de vibrar de la estructura y la modificación de su amortiguamiento.

Recientes trabajos muestran que además la IDSE tiene influencia por ejemplo, en reducir la ductilidad de las estructuras (Avilés y Pérez-Rocha, 2011); en el patrón del mecanismo de colapso de estructuras de acero (Fernández y León, 2008); el cambio de la distribución de los elementos mecánicos de marcos con muros; así como en la evolución del mecanismo de disipación (Carbonari, *et al.*, 2011).

Existen investigaciones encaminadas a obtener la influencia que tiene la IDSE en la eficiencia de los dispositivos de control de la respuesta. Wu *et al.*, en 1999 obtuvieron la eficiencia de los dispositivos masas antiresonantes considerando la IDSE, señalando que el dispositivo reduce en menor porcentaje las solicitaciones de la estructura si se considera la IDSE.

Por otra parte Stehmeyer, *et al.*, en 2008, estudiaron el efecto que tiene la IDSE en aisladores sísmicos de un puente, estos autores obtuvieron la efectividad del refuerzo con aislamiento sísmico para distintos niveles de flexibilidad del suelo.

Se han mencionado indicios de que la IDSE tiene influencia en la eficiencia de las nuevas técnicas de control de la respuesta. Por ello, es imperante realizar análisis dinámicos de estructuras con disipadores de energía incluyendo los efectos de la interacción dinámica suelo estructura, y observar cual es la respuesta del sistema y la funcionalidad del disipador de energía, con la finalidad de establecer en qué condiciones podemos asegurar un buen comportamiento del dispositivo sismoresistente.

Como más adelante se explica, existen varios tipos de disipadores de energía, para fines de esta tesis solo se usaran disipadores de energía por histéresis.

## **1.2 Objetivo general.**

Obtener mediante un análisis dinámico el efecto de la interacción dinámica suelo estructura (IDSE) en la respuesta de marcos planos con disipadores de energía por histéresis.

## **1.3 Objetivos particulares.**

- Proponer una cimentación y varios tipos de suelo de soporte del marco.
- Proponer la distribución de los disipadores.
- Realizar un análisis dinámico para las distintas condiciones de apoyo del marco.
- Obtener los principales parámetros que intervienen en la respuesta del sistema, con y sin IDSE.
- Revisar la eficiencia del disipador de energía con y sin IDSE en términos de cómo afectan la respuesta de la estructura.



## **1.4 Metodología.**

- Realizar una revisión bibliográfica de las principales investigaciones relacionadas con disipadores de energía e interacción dinámica suelo estructura, después, hacer un filtrado de las fuentes de información útiles para cumplir con los objetivos de esta investigación.
- Elección del marco para su análisis, se usaran marcos de un edificio, reportado en la literatura con un diseño razonable y común en la práctica.
- Elección del tipo de suelo de desplante, conocer las principales características dinámicas del terreno.
- Proponer una solución para la cimentación del edificio.
- Calcular las funciones de impedancia del sistema suelo-cimentación.
- Modelar el marco en OpenSees ya que este software permite modelar el disipador de energía y modelar la rigidez dinámica del sistema suelo-cimentación.
- Analizar el marco distinguiendo dos casos particulares, los modelos en base rígida y los modelos con distintos niveles de flexibilidad en la base.
- Revisar la respuesta de la estructura, en términos de los desplazamientos totales de la estructura, los desplazamientos relativos de entrepiso, la energía de entrada y la energía disipada por el sistema de control de la respuesta, para todos los casos de apoyo del marco.
- Redactar documento.

## **1.5 Alcance.**

El principal alcance de esta tesis radica en obtener el impacto que tiene el considerar la flexibilidad del suelo en la respuesta de estructuras, en específico marcos planos reforzados con dispositivos disipadores de energía.

En general se pretende obtener en qué condiciones la IDSE modifica la respuesta dinámica del marco y del sistema de disipación, en particular se busca definir el efecto de la IDSE sobre la efectividad de cada dispositivo disipador de energía.

## **1.6 Limitaciones.**

En este trabajo se analizarán marcos en el plano y no una estructura en 3D que considere cualquier efecto fuera del plano.

Los disipadores de energía se modelaron a través de un elemento que se define por dos nodos colocados en la misma ubicación, conectados por un material, que representa la relación fuerza-deformación del disipador. Este elemento no considera la geometría del disipador.

En cuanto al suelo de desplante se considera que es un semiespacio homogéneo, que se puede caracterizar por la velocidad de propagación de ondas de cortante.

La rigidez dinámica del sistema suelo cimentación se representa por un juego de resortes colocados en la base del marco.

El amortiguamiento del sistema suelo cimentación se considera en este trabajo a través de un amortiguamiento equivalente.

## **1.7 Organización de la tesis.**

En el capítulo 1 de esta tesis se presenta el planteamiento del problema, se definen los objetivos de esta investigación, la metodología que se ocupará y finalmente se establecen los alcances y limitaciones del trabajo.

En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica de las principales investigaciones referentes a disipación de energía e interacción dinámica suelo estructura. Se definen los principales conceptos de estos dos temas, se muestran aplicaciones de los distintos tipos de disipadores de energía y algunos trabajos encaminados a obtener la influencia de la IDSE en la eficiencia de las nuevas técnicas de control de la respuesta.

En el capítulo 3 se definen las principales características del modelado de marcos con disipadores de energía, tomando en cuenta la interacción dinámica suelo estructura. Para modelar la rigidez dinámica del sistema suelo cimentación se hizo a través de un juego de resortes colocados en la base del marco. Para modelar el disipador de energía se utilizó un elemento de longitud cero, definido por dos nodos conectados por un material con relación fuerza deformación del disipador. Se presentan calibraciones del modelo comparadas con algunos resultados que se reportan en la literatura. Finalmente se muestra los resultados de un ejemplo de un marco de un nivel, reforzado con disipadores de energía considerando la IDSE, sujeto al sismo del Centro S-E, 1940 y a un ruido blanco.

En el capítulo 4 se hace una descripción general del marco y la cimentación en estudio. Se establecen las propiedades de los suelos aquí estudiados. Se muestran las funciones de impedancia del sistema suelo cimentación. Se presentan las fuerzas y desplazamientos de fluencia de los disipadores de energía. Finalmente se reportan los resultados del marco de diez niveles con distintos niveles de flexibilidad del suelo, sujeto a los registros de SCT E-W, 1985, Viveros N-E, 1985 y a un ruido blanco.

Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

# Capítulo 2 Antecedentes.

## 2.1 Dispositivo disipador de energía.

Los dispositivos disipadores de energía son parte de las nuevas técnicas de control de la respuesta sísmica desarrolladas en las últimas décadas en distintos países, como una solución a la problemática de las ciudades con estructuras de mediana y gran altura que se encuentran en zonas de alta sismicidad. Estas técnicas se han utilizado recientemente como una opción de diseño original o de refuerzo en distintas construcciones tanto de la ciudad de México como en el mundo, por ejemplo, en la Torre Mayor, en las oficinas centrales del IMSS y en el hospital 20 de noviembre del ISSTE de México (Tena, 2003), o en el Hotel Stockton y en Kaiser Santa Clara Medical Center en California (Symans *et al.*, 2008), (Figura 1).

El principal objetivo de estas técnicas de control es reducir la demanda de disipación de energía inelástica del sistema estructural, (Symans *et al.*, 2008). Ésto reduce las solicitaciones dinámicas de los elementos estructurales debido a que el dispositivo toma gran parte de dichas demandas.

La forma de ilustrar el concepto de cómo trabajan los disipadores de energía fue planteado por Uang y Bertero (1990), donde establecen que la ecuación de la conservación de energía que entra a la estructura a través de una excitación en su base, es igual a la contribución de los distintos mecanismos de disipación de energía, como se muestra en ecuación [1]

$$E = E_E + E_C + E_H + E_A \quad [1]$$

dónde:

$E$  Energía de entrada que el sismo le induce a la estructura.

$E_E$  Energía que se disipa por deformación elástica de la estructura, este tipo de energía se considera recuperable.

$E_C$  Energía cinética que se disipa por el movimiento de la estructura.

$E_H$  Energía que se disipa por ciclos histeréticos de algún elemento estructural.

$E_A$  Energía que se disipa por el amortiguamiento.



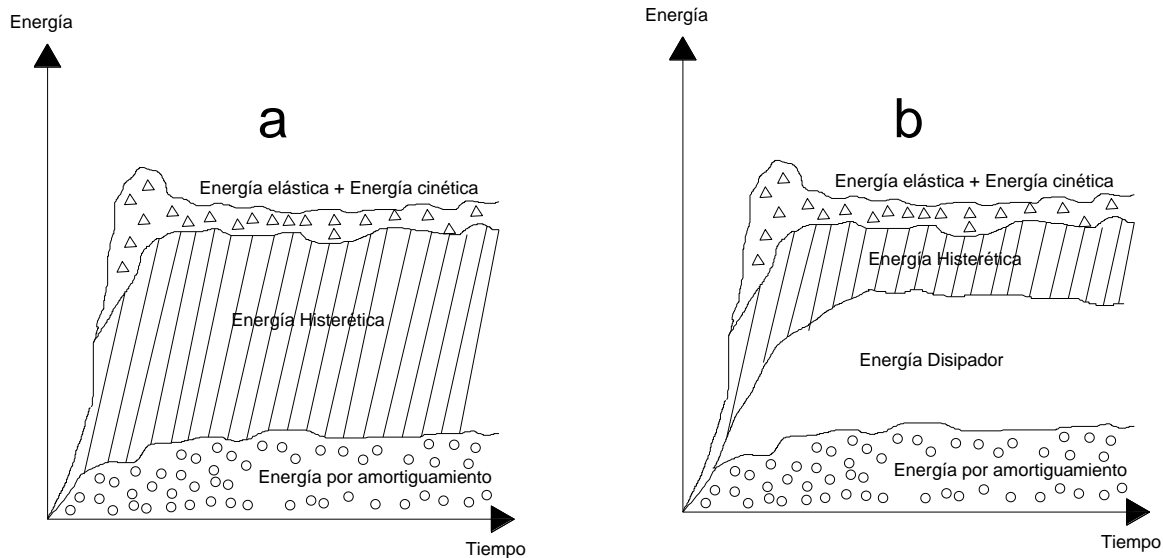
*Figura 1 Medical Center Santa Clara y Hotel Stockton (tomada de Symans et al., 2008)*

Al entender la ecuación [1], se puede decir que para un edificio donde la energía sea disipada solamente por los primeros dos términos de la ecuación, se volvería un diseño poco costeable, ya que lograr que los componentes estructurales solo trabajen en su intervalo elástico, se vuelve económicamente no factible.

Lo que el diseño convencional permite y los reglamentos aceptan es disipar energía por deformación inelástica de las estructuras, generalmente concentrada en las vigas; el término  $E_H$  se asocia a un daño estructural permanente, al recurrir al comportamiento no lineal de los elementos estructurales para disipar energía se están permitiendo daños en el sistema estructural que ponen en riesgo la estabilidad de la estructura.

El trabajo de los disipadores de energía es contribuir en maximizar el término de disipación de energía por deformación inelástica  $E_H$  pero en elementos diseñados especialmente para realizar este trabajo; o incrementar el término de energía disipada por amortiguamiento  $E_A$  para así disminuir los daños asociados a la disipación de energía por deformación inelástica de los elementos estructurales como vigas y columnas, esta idea se muestra en la Figura 2.

Se ha observado que el amortiguamiento que poseen las estructuras es alrededor del 5% del crítico, el impacto que tendría aumentar el amortiguamiento de una estructura a través de un dispositivo sería benéfico según el balance de energía planteado en la ecuación [1]. Se ha observado que para distintos dispositivos el amortiguamiento puede incrementar hasta en un 20% el amortiguamiento crítico



**Figura 2 a) balance de energía de un sistema sin disipadores de energía y b) balance de energía de un sistema con disipadores de energía**

### 2.1.1 Tipos de disipadores de energía

En los últimos años se han desarrollado una variedad amplia de dispositivos de control de la respuesta, pero éstos pueden ser clasificados en tres grandes grupos: sistemas de control pasivo, activo y semiactivo. La diferencia principal entre estos sistemas de control es que el control pasivo a diferencia de los otros sistemas no requiere de alguna fuente de poder o energía adicional para su funcionamiento.

Los sistemas de control pasivo hacen la función de un fusible estructural que trabaja cuando las fuerzas accidentales se presentan, en dicho fusible se concentra la mayor parte del daño estructural lo que hace sencillo la reparación o el reemplazo después de la ocurrencia de un sismo.

En función de la manera en que los sistemas de control pasivo disipan energía se pueden clasificar en (Symans *et al.*, 2008):

- Disipadores de energía por deformación inelástica del material, también conocidos como disipadores por histéresis.
- Disipadores de energía por fricción del material.
- Disipadores viscoelásticos.
- Disipadores por fluidos viscosos o disipadores viscosos.

Los disipadores por histéresis son los dispositivos más utilizados y uno de los primeros en desarrollarse. Se basan en la idea de disipar la energía por deformación inelástica cíclica del material.

Los primeros trabajos de disipación por histéresis datan del año 1972 en Nueva Zelanda dirigidos por James Kelly y Skinner, donde se desarrolló la idea de utilizar soleras de acero en forma de U para disipar energía.

Uno de los dispositivos que disipa energía por histéresis son los conocidos como dispositivo ADAS (Added Damping and Stiffness), desarrollados en Estados Unidos entre los años 1986 y 1987. Consisten en placas metálicas en forma de X o de un reloj de arena, como el de la Figura 3; esta forma geométrica garantiza la fluencia uniforme del material debido a las condiciones de apoyo del dispositivo (Soong, 2002).

El uso de dispositivos tipo ADAS es bastante amplio, estos dispositivos fueron desarrollados por Roger Scholl (Tena, 2003) y se han usado tanto para la reestructuración de edificios que han sido dañados después de la ocurrencia de un sismo fuerte como el de 1985 en México, o en proyectos de edificios nuevos.



*Figura 3 Dispositivo ADAS (tomada de sirve.cl)*

En México los dispositivos ADAS se usaron para reestructurar el Edificio Izagaga 38-40, el hospital de cardiología del centro médico siglo XXI, ambos ubicados en la zona de lago de la ciudad, y para reestructurar las oficinas centrales del IMSS, o en edificios nuevos como la Jolla ubicado en Acapulco, por mencionar algunas aplicaciones de este dispositivo (Tena,2003).

Después de la invención de los ADAS surgieron distintas variantes de dispositivos como el tipo TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) desarrollado por Tsai en 1993 en Taiwán (Figura 4)

Estos dispositivos, funcionan ante la presencia de una fuerza cortante con la diferencia que los dispositivos ADAS se flexionan en curvatura doble y los tipo TADAS en curvatura simple, esto por las condiciones de apoyo del dispositivo, generalmente estos dispositivos se suelen montar sobre sistemas de contravientos. (Tena, 2000).



*Figura 4 Dispositivo TADAS (Whittaker et al. 1999).*

Se han estudiado en distintos países dispositivos disipadores de energía por histéresis, por ejemplo en México, Tena, 2003 reporta que Aguirre y Sánchez en 1992 estudiaron dispositivos tipo Solera (DS), el cual disipa energía por el rolado por flexión semejante a la manera en que se deforman las orugas de un tractor; en Taiwán se desarrollaron los dispositivos panel de cortante; y en Japón en los años 80s se desarrollaron los llamados tendones desadheridos. En la Figura 1 se muestra una aplicación de los tendones desadheridos reforzando el Medical Center Santa Clara.

Los disipadores por fricción del material, disipan energía a través de la fricción entre dos cuerpos solidos; Avtar Pall de Canadá propuso un dispositivo llamado tipo Pall. El funcionamiento se basa en la forma en que trabajan las balatas de un automóvil. Otro dispositivo que disipa energía por la fricción de placas de aleación de cobre, es el desarrollado en Japón en los años 80s, el dispositivo Sumitomo (Tena, 2014).

Existen dispositivos llamados conexiones atornilladas fricciones, éstos fueron desarrolladas por Fitzgerald y se basan en disipar energía por conexiones atornilladas de marcos contraeventados concéntricos, dejando juego a los agujeros para que los tornillos se pueden deslizar y producir la fricción.

Los disipadores viscosos se basan en la teoría que se emplea en los amortiguadores automotrices y que es obtener un comportamiento viscoso al forzar a un fluido a pasar por un orificio, si se consideran las leyes de los fluidos, al hacer pasar el fluido por un orificio, de área reducida. Para que se conserve la cantidad de fluido se tiene que incrementar la velocidad de éste y así es como se logra disipar energía (Symans 2008). Esta misma ideología se ha adaptado al campo de la ingeniería estructural.

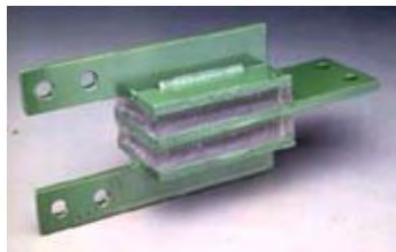
Los dispositivos Taylor son los más conocidos de este tipo, son instalados sobre un sistema de contravientos, como en el caso de la Torre Mayor de la ciudad de México de la Figura 5.





*Figura 5 Disipadores Taylor en la Torre Mayor de la ciudad de México (tomada de EMRSA).*

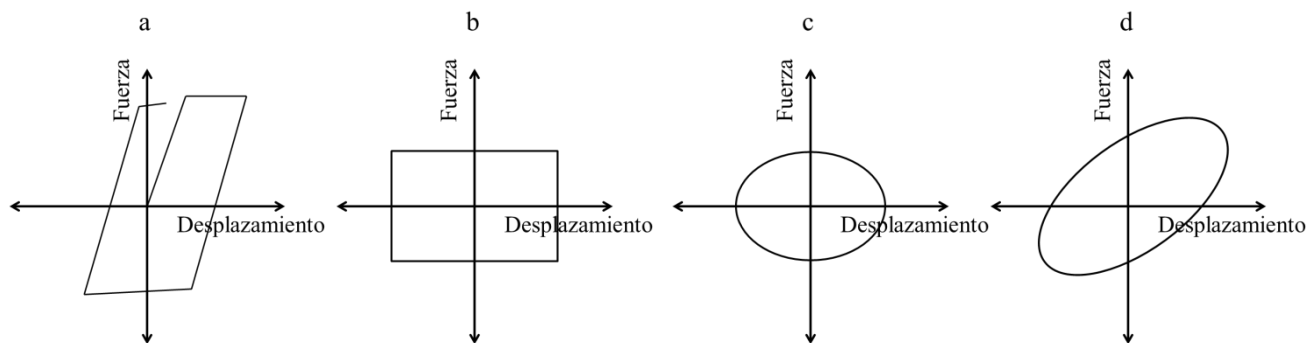
Los dispositivos viscoelásticos están hechos de capas de polímero acrílicos firmemente adheridos (Figura 6). Se ha observado que su comportamiento es función de la frecuencia de oscilación y de la temperatura, lo que hace difícil el modelado considerando estas variables. Existen distintas aplicaciones de estos dispositivos, por ejemplo en México las oficinas del corporativo 3M. En Estados Unidos se utilizaron en las hoy extintas torres gemelas (Tena, 2014).



*Figura 6 Disipador Viscoelástico (Whittaker et al. 1999).*

Se ha desarrollado en Chile una versión económica de estos dispositivos usando caucho, también en Japón se han desarrollado muros con un comportamiento viscoelástico.

Una forma de diferenciar los tipos de disipadores de energía por ciclos histeréticos es por la forma geométrica del ciclo, como se observa en la Figura 7.



**Figura 7 Ciclos de histéresis a) Disipador por deformación plástica, b) Disipador por fricción, c) Disipador viscoso y d) Disipador Viscoelástico.**

## 2.1.2 Aplicaciones

Como ya se ha comentado, el uso de los dispositivos disipadores de energía es bastante amplio en todo el mundo y en México, se han usado para reforzar estructuras que han sido sometidas a un movimiento telúrico de gran intensidad, o se han implementado en edificios nuevos como parte del diseño original. La Tabla I muestra varias estructuras que poseen disipadores de energía, además muestra el tipo de dispositivo que se reporta en la bibliografía, así como información acerca de si es un edificio reparado o una construcción nueva.

*Tabla I Aplicaciones de dispositivos disipadores de energía a edificios (Tena, 2003 y Symans, 2008).*

<b>Estructura</b>	<b>Tipo</b>	<b>País o Ciudad</b>	<b>Reparado/Nuevo</b>
<b>Edificio Izagaga 38-40</b>	ADAS	México, DF.	Reforzado
<b>Hospital de cardiología del centro médico del siglo XXI</b>	ADAS	México, DF	Reforzado
<b>Oficinas centrales del IMSS</b>	ADAS	México, DF	Reforzado
<b>Conjunto la Jolla</b>	ADAS	Acapulco	Nuevo
<b>Edificio Torre Monterrey</b>	ADAS	México, DF	Reforzado
<b>Edificio de almacén de automóviles</b>	ADAS	Acapulco	Nuevo
<b>Torre Mayor</b>	Tipo Taylor	México, DF	Nuevo
<b>Edificio del corporativo 3M</b>	Viscoelástico	México, DF	Nuevo
<b>Edificio Córdoba</b>	ADAS	México, DF	Reforzado
<b>Edificio Romanza (proceso)</b>	ADAS	Acapulco	Nuevo
<b>Edificio Nautilus (proceso)</b>	ADAS	Acapulco	Nuevo
<b>Hospital 20 de Noviembre del ISSSTE</b>	Friccionantes	México, DF	Reforzada
<b>Edificio Fray Servando</b>	Tipo Taylor	México, DF	Reforzada
<b>Edificio Intercentro</b>	Tipo Taylor	República Dominicana	Nuevo
<b>Centro Administrativo Distrital</b>	Tipo Taylor	Colombia	Reforzado
<b>Edificio de departamentos</b>	Tendones	Los Ángeles	Reforzado
<b>Hotel Stockton</b>	Desadheridos	California	Reforzado
	Tendones	California	Reforzado
	Desadheridos		
<b>Wallace F. Bennett Federal Building;</b>	Tendones	-	Refuerzo
<b>Santa Clara Medical Center</b>	Desadheridos		
	Tendones	Santa Clara, California	Nuevo
<b>Centro de Gobierno</b>	Desadheridos		
	Conexiones	-	Refuerzo
	Friccionantes		
<b>Patient Tower</b>	Friccionantes	Seattle	Refuerzo
<b>LAPD Recruit Training Center</b>	Viscoelástico	Los Angeles	Refuerzo
<b>San Mateo County Hall of Justice</b>	Viscoelástico	Los Angeles	Refuerzo

### 2.1.3 Normatividad y Reglamentación vigente

En la actualidad existen muchas aplicaciones en estructuras con dispositivos que disipan por algún mecanismo energía, pero en los códigos y reglamentaciones vigentes, la mención acerca del diseño e implementación de estos dispositivos es prácticamente nula. En las NTCS-2004 en la sección 1.12, sobre Estructuras con sistemas no convencionales de resistencia sísmica, se menciona que: “Cuando la estructura se aíse sísmicamente en su base, o se adopten dispositivos especiales capaces de disipar energía por amortiguamiento o comportamiento inelástico, podrán emplearse criterios de diseño sísmico que difieran de los aquí especificados, pero congruentes con ellos, si se demuestran, a satisfacción de la Administración, tanto la eficacia de los dispositivos o soluciones estructurales, como la validez de los valores del amortiguamiento y del factor de comportamiento sísmico que se propongan.”

Lo que reflejan las normas es que la construcción de edificios con sistemas de disipación son permitidos bajo una cierta supervisión de personas expertas en el tema; aunque no se muestran el camino a seguir. Es por ello que ha despertado la inquietud de muchos investigadores que han dirigido sus estudios a tratar de concretar una propuesta de norma que especifique el diseño de estructuras con disipadores de energía.

Por otro lado en el manual de diseño de la CFE (MOCS-2008) se encuentra el subcapítulo 3.13.3 acerca de sistemas con dispositivos disipadores de energía; aunque solo se muestran algunas recomendaciones resultado de varias investigaciones. Por ejemplo, la que se señala en la sección 3.13.3.2.1 “Cuando los disipadores se colocan en una estructura, su comportamiento debe ser tal que el área histerética que desarrollen sea suficientemente grande, y que la demanda de ductilidad se encuentre dentro de límites tolerables. Además, se tratará que el desplazamiento de fluencia de los disipadores sea suficientemente pequeño en comparación con el del sistema que se pretende proteger, de manera que primero fluya el sistema disipador y posteriormente los elementos de la estructura principal.”

La filosofía de diseño que se propone en el párrafo anterior sería, disipador muy débil, contraviento débil, viga fuerte y columna muy fuerte, es decir se pretende que primero fluya el disipador concentrando todo o gran parte del daño en este fusible con la finalidad que se garantice la funcionalidad total de la estructura después de la ocurrencia del sismo.

También se especifica que los desplazamientos con los que inician el trabajo los disipadores de energía sean inferiores a los que producen un daño estructural, además la colocación y distribución en planta de estos sistemas debe ser tal que evite problemas de torsión, así como evitar concentraciones excesivas de deformación inelástica en un solo nivel (MOCS-2008).

Otro punto importante que se menciona en este manual es que se deberá considerar la fatiga de los disipadores histeréticos, es decir el número de deformaciones cíclicas que puede desarrollar el dispositivo antes de la falla (MOCS-2008). Además, se hace mención que las relaciones fuerza-desplazamiento o fuerza-velocidad deben ser verificadas experimentalmente mediante ensayos de laboratorio supervisados por autoridades correspondientes (MOCS-2008).

Como se observa existen las bases, pero no una norma que establezca las condiciones de diseño de estructuras con disipadores de energía, por ello la importancia de realizar estudios del sistema estructura-disipador modificando variables que intervengan en la respuesta dinámica como lo es la IDSE.

El estado de la normatividad internacional es muy similar a nuestro país, aunque existen algunos países que llevan un gran avance en comparación con el nuestro.

Se han revisado distintas normas oficiales de distintos países (Ruiz y Álvarez, 1995) analizando los aspectos relacionados al diseño y refuerzo de estructuras con aisladores de base o con disipadores de energía, encontrando que se permite el uso de dispositivos con la condición de que el diseño sea aprobado por una autoridad competente, tal como también se señala en las NTCS-2004.

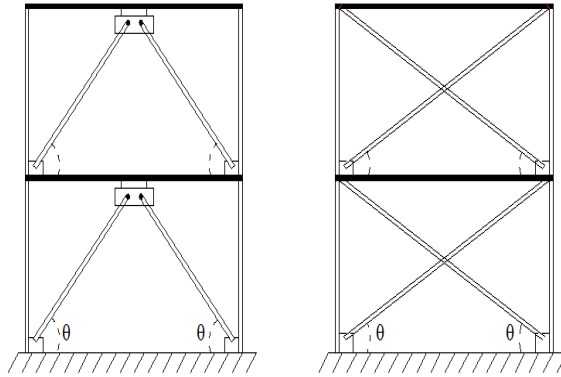
## **2.1.4 Modelación de estructuras con disipadores de energía**

Generalmente los dispositivos disipadores de energía se montan sobre contravientos en distintos arreglos, ya sean en tipos concéntricos o tipo chevrón, como los de la Figura 8, en esta tesis se usaran arreglos tipo chevrón, debido a que este arreglo es muy común, para el montado de disipadores en la práctica. Una manera de modelar el sistema es por medio de diagonales equivalentes, considerando que el sistema contraviento disipador funciona como un sistema de resortes en serie.

La rigidez equivalente en contravientos tipo chevrón se puede calcular como se muestra en la ecuación [2] planteada en Chopra, 1995

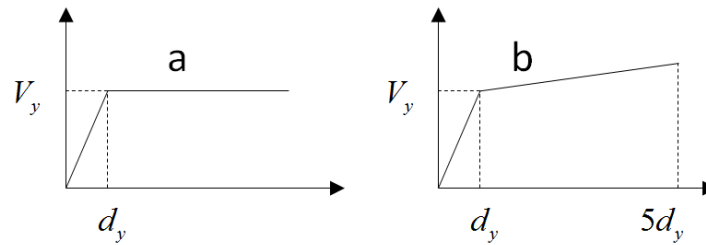
$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_c} + \frac{2 \cos^2 \theta}{k_d} \quad [2]$$

donde  $k_e$  es la rigidez de la diagonal equivalente,  $k_c$  es la rigidez del contraviento,  $k_d$  es la rigidez del disipador de energía y  $\theta$  el ángulo entre el eje horizontal y el contraviento.



**Figura 8 Montados comunes de disipadores de energía, izquierda tipo chevrón y derecha concéntrico**

Para modelar matemáticamente el disipador de energía han surgido varias propuestas, por ejemplo el método propuesto por Whittaker, reportado en Tena (2000), para dispositivos ADAS. El método se basa en las siguientes suposiciones: primero las placas son en forma de X, completamente restringidas en sus extremos; segundo, las placas se deforman en curvatura doble y por último el espesor equivalente de la placa en su extremo es igual a la mitad de su altura ( $b_{eq}$ ). La curva fuerza deformación se puede idealizar como una curva elastoplástica perfecta como el de la Figura 9a o bilineal como en la Figura 9b.



**Figura 9 Curvas fuerza deformación de dispositivos ADAS**

A partir de la manera en que se deforman el dispositivo se pueden calcular los desplazamientos de fluencia para este modelo (Tena, 2000), mediante la ecuación [3]

$$d_y = \iint \frac{M_{px}(z)}{EI_x(z)} dx \quad [3]$$

donde:  $M_{px}$  es el momento de sección plástica,  $E$ , es el módulo de elasticidad del material del disipador e  $I_x$  es el momento de inercia de la sección; resolviendo la doble integral y simplificando se tienen que el desplazamiento de fluencia es (ecuación [4]):

$$d_y = \frac{3}{4} \frac{\sigma_y l^2}{Et} \quad [4]$$

El cortante de fluencia  $V_y$ , se obtiene por equilibrio, ecuación [5] y la rigidez del dispositivo  $k_d$ , sería entonces la que se muestra en la ecuación [6]

$$V_y = \frac{\sigma_y b_{eq} t^2}{2l} \quad [5]$$

$$k_d = \frac{V_y}{d_y} \quad [6]$$

donde  $l$  es la altura del dispositivo y  $t$  es la distancia del centroide a la fibra más alejada del disipador.

En Christopoulos y Filiatrault (2006), se muestra una metodología encaminada a obtener el valor óptimo de la fuerza y desplazamiento de fluencia que maximice la capacidad de disipar energía del dispositivo, la fuerza lateral,  $F_{lat}$ , requerida para activar el disipador de energía se calcula con la ecuación [7]

$$\frac{F_{lat}}{W} = \frac{\pi a_g}{2g} \quad [7]$$

dónde  $W$  es el peso del entrepiso,  $a_g$  es la aceleración máxima del suelo. Se observa en la ecuación [7], que la fuerza de activación varía conforme a la elevación de la estructura, esto debido a la variación de  $W$  en la altura. Con esta metodología se calcularon los valores óptimos de fluencia de los disipadores usados en esta tesis, como más adelante se explica.

## 2.2 Interacción Dinámica Suelo Estructura (IDSE).

El fenómeno de la interacción dinámica suelo estructura (IDSE) suele estar relacionado a las modificaciones de la respuesta de la estructura y del movimiento de entrada debido a la flexibilidad del sistema suelo cimentación.

Cabe señalar que este efecto suele llamarse interacción suelo estructura (ISE) aunque en esta tesis se hace una distinción entre la parte dinámica y la parte estática de la ISE, ya que se considera que la parte estática involucra esfuerzos y deformaciones inducidas únicamente por cargas gravitacionales y permanentes.

El diseño convencional de edificios empleado en gran parte de los despachos estructurales, simplifica el problema dinámico para poder aproximar y determinar cómo se comportará la estructura ante un sismo. Ciertamente los análisis encontrados en la literatura muestran que la respuesta dinámica de un edificio está ligada especialmente a las propiedades dinámicas

intrínsecas de la estructura, como son, masa, amortiguamiento y rigidez, y se deja a un lado la condición de apoyo de la estructura.

La condición de apoyo de la estructura depende del suelo de desplante y de la cimentación, y explícitamente, de la compatibilidad de deformaciones de este sistema. Como para cualquier problema estático o dinámico los soportes de la estructura son fundamentales para conocer su respuesta.

La diferencia principal de las condiciones de apoyo de una estructura radica en los desplazamientos relativos entre el suelo y la cimentación. Por un lado, si tenemos que construir sobre suelos que son bastante rígidos, como por ejemplo, lechos rocosos, la deformación relativa entre la cimentación y el suelo es muy pequeña, por lo tanto se considera una condición de apoyo fija o empotrada. Por otro lado, si consideramos que el suelo de desplante es muy flexible, como lo son los lechos arcillosos, la condición de apoyo no puede considerarse como fija ya que el desplazamiento relativo de la cimentación y el suelo es muy grande, debido a la alta diferencia de rigideces.

En México el problema dinámico del suelo toma relevancia debido al terreno arcilloso y muy flexible característico de la ciudad, aunque en la práctica profesional el diseño de estructuras sobre suelos flexibles se ve acotada al tomar en cuenta sólo los efectos de sitio y se desprecian, en muchas ocasiones, los efectos de interacción dinámica suelo estructura (IDSE).

Un análisis completo de una edificación debe tomar en cuenta ambos efectos, la principal razón por lo que se desprecian algunos efectos y otros no, es por la complejidad de considerar la IDSE en el modelo matemático de un sistema estructural soportado sobre un suelo flexible.

### **2.2.1 Concepto de IDSE y efectos de sitio**

Housner en 1957 consideró necesario incluir en la respuesta de los edificios las propiedades dinámicas del suelo de desplante, incluyendo así en los diseños de edificaciones la influencia de la IDSE.

El fenómeno de IDSE consiste en un conjunto de efectos tanto cinemáticos como inerciales producidos en la estructura y el suelo, como resultado de la flexibilidad de éste ante excitación sísmica (Avilés, 2006). En otras palabras la interacción relaciona las características dinámicas de la estructura y el suelo de desplante.

El efecto cinemático de la IDSE se suele considerar como una excitación efectiva, debida a un filtrado de la aceleración sísmica, por la presencia de una cimentación rígida. Dicho efecto



se debe al acoplamiento de desplazamientos debido a la diferencia de rigideces del suelo y la cimentación

Cuando se considera que la aceleración sísmica en la base de la estructura es igual al movimiento que se tendría en el suelo en ausencia de la estructura, el efecto de interacción proviene de la flexibilidad del sistema. Este efecto se conoce como interacción inercial y está controlado por la diferencia de rigidez del suelo y la estructura (Avilés, 2006).

Generalmente en el diseño convencional sólo se toman en cuenta los efectos inerciales con una excitación sísmica directa, aunque no puede despreciarse la modificación de movimiento que se produce por la interacción cinemática.

La normatividad vigente suele suponer que los efectos de IDSE se reflejan en un cambio en el periodo fundamental del sistema como se menciona en el apéndice A.6 de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo (NTC-Sismo, 2004), además también consideran un cambio en el nivel de amortiguamiento. Estas mismas modificaciones se señalan en el Manual de Diseño de la CFE (MOCS-2008).

En investigaciones previas se ha observado que la interacción inercial produce un alargamiento del periodo fundamental de vibración, una modificación del amortiguamiento y la reducción de la ductilidad, con respecto a valores que tendría la estructura supuesta con base rígida (Avilés y Pérez-Rocha, 2003).

La IDSE modifica las propiedades dinámicas de la estructura, como el periodo, debido a la diferencia del sistema con y sin IDSE, al no considerar la interacción, el sistema tiene una cierta rigidez; cuando se considera la interacción la rigidez disminuye. Por lo tanto, de las ecuaciones básicas de la dinámica, al tener menos rigidez de un sistema el periodo aumenta, en conclusión el efecto de la IDSE es flexibilizar el sistema y aumentar su periodo de vibración (Jennings y Bielak, 1973).

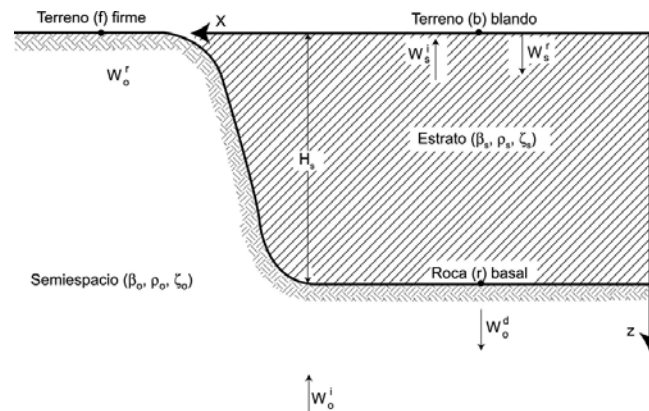
Al suponer que el suelo puede deformarse por tener cierta flexibilidad, existe un trabajo de disipación de energía propia del suelo ante la excitación sísmica, por eso, es común observar que en la respuesta de estructuras con IDSE, el amortiguamiento del sistema aumenta en general, aunque no en todos los casos.

Avilés (2006), hace referencia al concepto interacción cinemática, referido por Luco y Wong, 1987. En estos trabajos se menciona que consiste en un cambio en los movimientos de excitación, y generalmente se ha observado que la interacción cinemática reduce los movimientos de traslación de la cimentación, y genera un cabeceo y torsión de la cimentación.

Los efectos de las condiciones locales o los llamados efectos de sitio producen variaciones en el movimiento sísmico debido, a que las ondas incidentes sufren difracciones múltiples al

llegar a la frontera entre materiales distintos, generando interferencias constructivas o destructivas, es decir los efectos locales producen o una amplificación o una atenuación de la intensidad del movimiento del terreno.

Los efectos de sitio son un fenómeno resultado de la propagación de ondas por medios estratificados, existen modelos sencillos de propagación unidimensional de ondas de cortante sobre un estrato homogéneo como el que se presenta en Avilés 2006, (Figura 10), que mide la modificación del movimiento en terreno firme al pasar por un estratigrafía relativamente blanda, el concepto que se usa para medir esta modificación es la llamada función de transferencia.



*Figura 10 Modelo de propagación de ondas (tomada de Avilés, 2006)*

Los estudios de los efectos de sitio en la ciudad de México se ven reflejados en la zonificación que se menciona en las NTCS (2004). Los distintos espectros de diseño para cada zona, así como sus características son el reflejo del tipo de suelo que existe en la zona.

## 2.2.2 Funciones de impedancia

La rigidez de cualquier elemento es una medida proporcional de qué tanto el elemento se opone a un movimiento. La rigidez es un parámetro ampliamente usado en los análisis estáticos y dinámicos de las estructuras, y generalmente depende de las características del material y de la geometría de este.

Para el sistema suelo cimentación, la medida de resistencia a los desplazamientos es también su rigidez. Para el caso de una carga dinámica, por ejemplo un sismo, estas rigideces se vuelven dinámicas, pero conservan el mismo concepto de rigidez, que es la relación de una fuerza perturbadora y el desplazamiento asociado a ésta (funciones de impedancia).

El concepto formal de función de impedancia o rigidez dinámica del sistema suelo cimentación, se refiere a una relación en estado estacionario de la fuerza dinámica y el desplazamiento asociado a ésta, para una cimentación rígida de masa despreciable, sujeta a una carga armónica (Avilés, 2006); la masa de la cimentación es despreciable, debido a que la masa del suelo es mucho mayor que la de la cimentación.

El principal problema del fenómeno de IDSE radica en el cálculo de las funciones de impedancia del sistema suelo cimentación, ya que para el cálculo de éstas se emplean análisis en el dominio de la frecuencia. La rigidez dinámica se compone de una parte real y una parte imaginaria, donde se ha intentado aislar la rigidez del sistema en la parte real y el amortiguamiento en la parte compleja.

En Avilés (2006), se menciona que con base a una analogía de un oscilador simple, la función de impedancia se suele expresar por medio de una función compleja (Gazetas, 1983). La función compleja se muestra en la Ecuación [8]

$$\bar{K}_m(\eta_m) = K_m^o [k_m(\eta_m) + i\eta_m c_m(\eta_m)] (1 + i2\zeta_s) \quad [8]$$

donde  $m$  indica la dirección de la traslación, ya sea horizontal, vertical, cabeceo o en acoplamiento,  $K_m^o$  es la rigidez estática del sistema suelo cimentación,  $\zeta_s$  es el amortiguamiento material del suelo,  $k_m$  y  $c_m$  son coeficientes de rigidez y amortiguamiento geométrico del suelo y  $\eta_m$  es a frecuencia normalizada que se muestra en la ecuación [9]

$$\eta_m = \frac{\omega R_m}{V_s} \quad [9]$$

donde  $V_s$  es la velocidad de ondas de corte del suelo y  $R_m$  es el radio equivalente a la superficie de la cimentación.

Generalmente se suele sustituir la función de impedancia por un arreglo de resortes y amortiguadores, si el resorte se representa por  $K_m$  y el amortiguador por  $C_m$ , la función de impedancia se puede definir mediante la ecuación compleja [10]

$$\bar{K}_m(\omega) = K_m(\omega) + i\omega C_m(\omega) \quad [10]$$

donde:

$$K_m = K_m^o (k_m - 2\zeta_s \eta_m c_m) \quad [11]$$

$$C_m = \frac{K_m^o (\eta_m c_m + 2\zeta_s k_m)}{\omega} \quad [12]$$

La complejidad del problema radica en que la función de impedancia es una función compleja que depende de la frecuencia de excitación, aunque en la actualidad existen potentes programas que con ciertos parámetros calculan la función de impedancia del sistema suelo cimentación.

### 2.2.3 Normatividad vigente

En las NTCS-2004, en el apéndice A.6, se muestran las modificaciones debidas a la IDSE, incluso dice que los efectos que ésta pueda provocar se pueden despreciar si se cumple la condición de la ecuación [13].

$$\frac{T_e}{T_s} \frac{H_s}{H_e} > 2.5 \quad [13]$$

donde  $H_s$  es la profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés,  $H_e$  es la altura efectiva de la estructura,  $T_e$  periodo de la estructura supuesta con base indeformable y  $T_s$  es periodo dominante más largo del terreno en el sitio de interés.

La principal modificación debida a la IDSE que se menciona en las normas, es el alargamiento del periodo del sistema que se determina según la ecuación [14]

$$T_e = \sqrt{T_e^2 + T_h^2 + T_r^2} \quad [14]$$

donde  $T_e$  es el periodo de la estructura con base indeformable,  $T_h$  y  $T_r$  son los periodos asociados a que la estructura fuera infinitamente rígida y la base pudiera trasladarse o girar.

El amortiguamiento también se ve afectado por la IDSE, el cual se determina con la expresión siguiente

$$\zeta_e = \zeta_e \left( \frac{T_e}{T_e} \right)^3 + \frac{\zeta_h}{1 + 2\zeta_h^2} \left( \frac{T_h}{T_e} \right)^2 + \frac{\zeta_r}{1 + 2\zeta_r^2} \left( \frac{T_r}{T_e} \right)^2 \quad [15]$$

También, se menciona el efecto de la IDSE sobre el cortante basal y se propone una expresión para calcularlo. En cuanto a la modificación de los desplazamientos laterales de la estructura, se propone la ecuación [16]

$$X_i = \frac{V_o}{V_o} \left[ X_i + (h_i + D) \frac{M_o}{K_r} \right] \quad [16]$$

donde  $M_0$  es el momento de volteo en la base de la cimentación,  $X_i$  es el desplazamiento lateral de  $i$ -ésimo nivel con base rígida,  $D$  es la profundidad de desplante y  $K_r$  la rigidez de rotación de la cimentación.

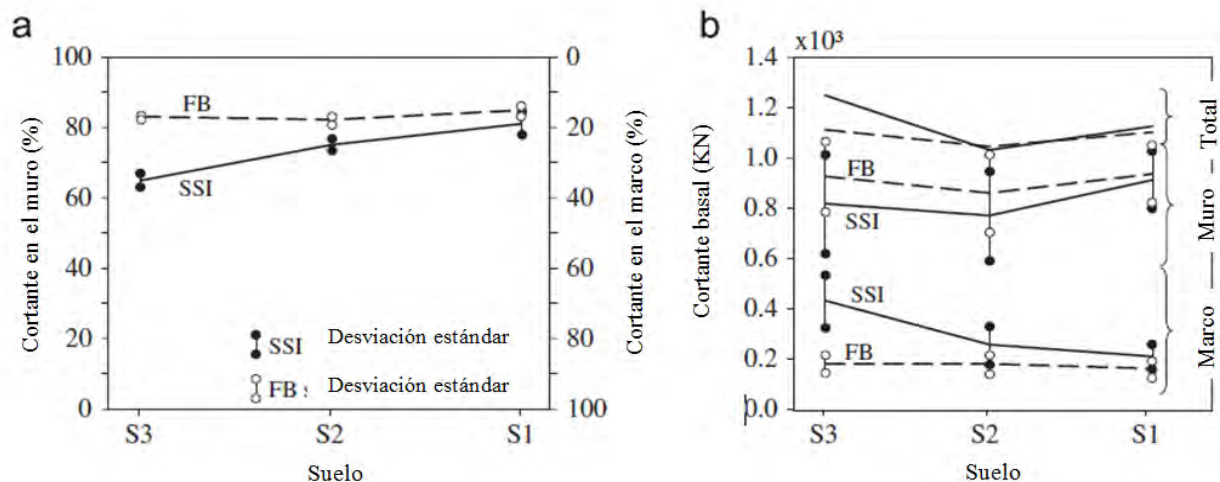
En esta misma sección dice “Estos desplazamientos deberán tenerse en cuenta en el cálculo de los efectos de segundo orden y la revisión del estado límite por choques con estructuras adyacentes” y no se hace mención de los desplazamientos para el diseño de los disipadores de energía.

## 2.2.4 Efectos de la IDSE sobre edificaciones

A pesar de que se tienen identificados los efectos de la IDSE en la modificación del periodo y el amortiguamiento éstas no son las únicas modificaciones relacionadas a este fenómeno. Estudios de Avilés y Pérez-Rocha en el 2011, demuestran que la IDSE reduce la ductilidad de las estructuras.

Recientes investigaciones muestran que la IDSE puede modificar la respuesta dinámica de la estructura, por ejemplo, Carbonari, *et al.*, en el 2011, muestran que la IDSE puede cambiar la distribución de los elementos mecánicos en edificios con muros de cortante. Carbonari *et al.*, determinaron el efecto de la IDSE en la respuesta de estructuras de marcos con muros con una cimentación a base de pilas sujetas a sismos moderados. Para su estudio consideran tres tipos de suelo y lo caracterizan por el valor de su velocidad de propagación de onda, emplean suelos con velocidad de onda de 400, 250 y 100  $m/s$

Un resultado que obtienen se puede observar en la Figura 11, donde se muestra la distribución por un lado del cortante basal entre el muro y el marco, para los tres distintos suelos, y se observa que mientras que en base fija el muro tomaba alrededor del 80% del cortante y el marco el 20% restante, esta distribución se ve modificada conforme cambia el tipo de suelo, para suelos más blandos, como el S3 (100  $m/s$ ) el muro toma alrededor del 60% de la fuerza y el marco tiene que tomar 40%, esto se traduce en mayores solicitaciones a las columnas.

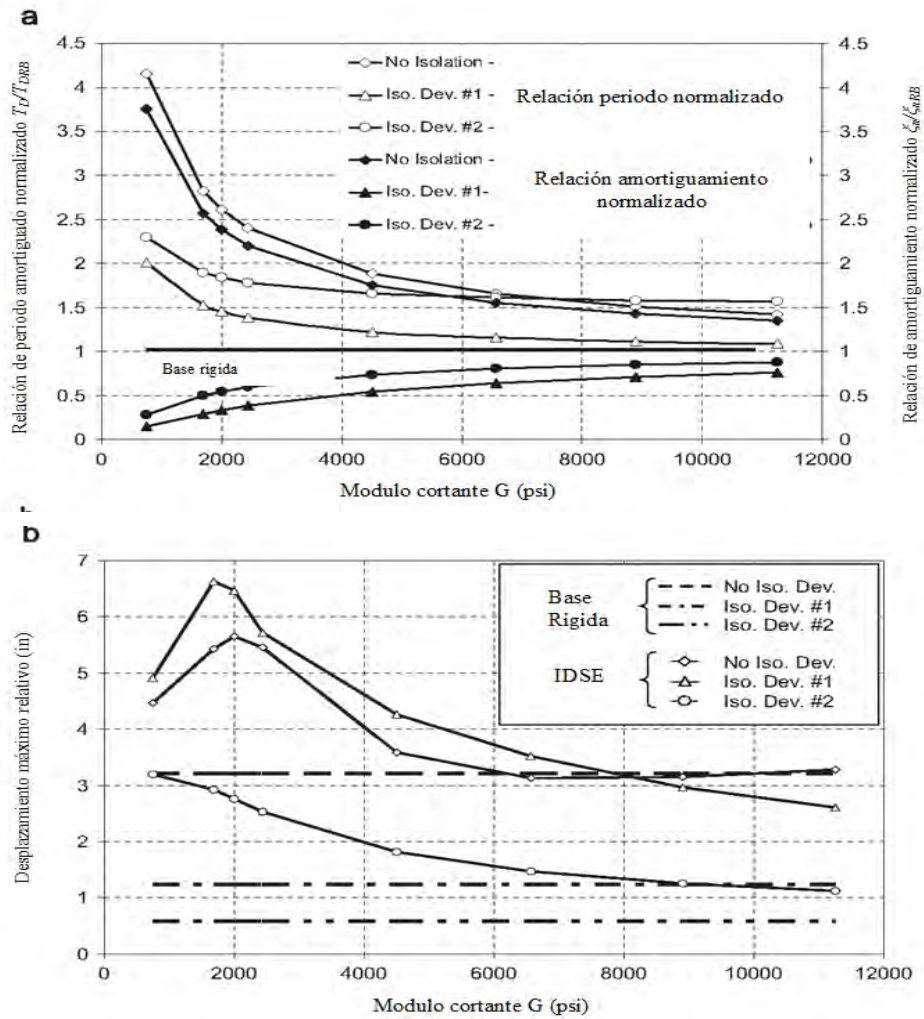


**Figura 11 (a) Distribución del cortante basal en los elementos estructurales y (b) el valor medio absoluto del cortante basal (Carbonari, et al., 2011); SSI: Interacción dinámica suelo estructura y FB base rígida.**

Stehmeyer *et al.*, en 2008 a partir de una metodología de elementos finitos muestran la influencia de la IDSE en la eficiencia del aislamiento sísmico en un puente. Para este estudio se consideró que el puente se soporta sobre ocho distintos tipos de suelo con velocidades de propagación de onda cortante desde 55 hasta 190  $m/s$ . El suelo se modeló como un semiespacio elástico. El aislador se encuentra entre la pila y la superestructura del puente.

Algunas observaciones que se obtienen de esta investigación es que la IDSE incrementa los desplazamientos máximos, también incrementa la relación de amortiguamiento para el sistema sin aislamiento y disminuye la relación de amortiguamiento para el sistema aislado, como se observa en la Figura 12a. Los resultados se muestran en función del módulo cortante del suelo; los suelos más blandos corresponden a módulos a corte pequeños.

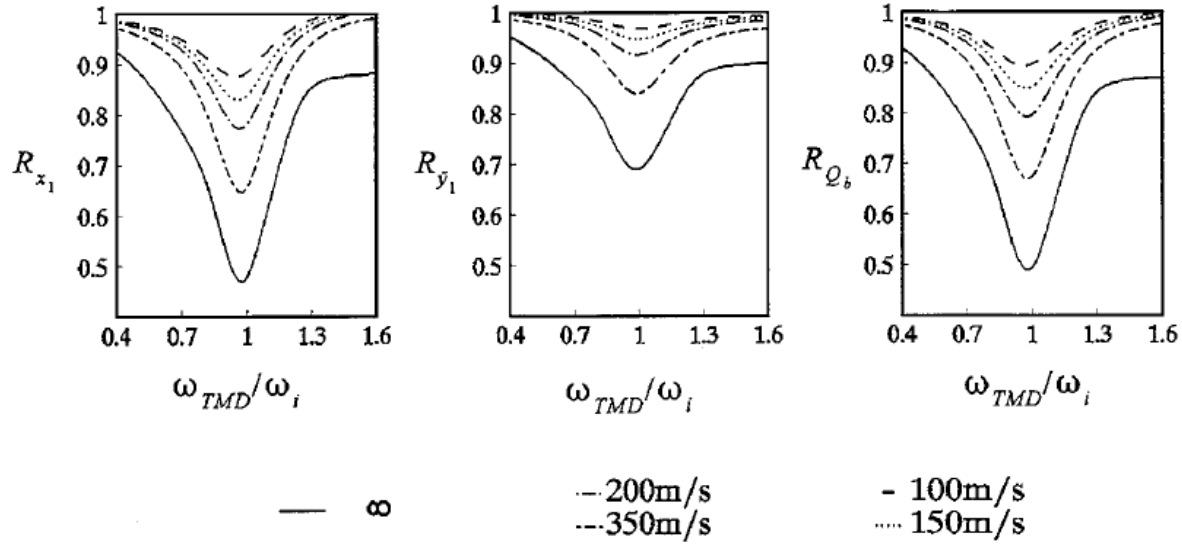
Otro punto que se observa en la Figura 12b, es que los aisladores reducen la demanda máxima si se considera base fija, si se considera la IDSE los aisladores sísmicos pueden aumentar o reducir la demanda máxima.



**Figura 12** Respuesta estructural considerando los efectos de la IDSE (a) relación periodo amortiguamiento normalizado y relación amortiguamiento compuesto normalizado y (b) y desplazamiento máximo relativo de la pila (tomada de Stehmeyer et al., 2008).

Wu *et al.*, en 1999 realizaron un análisis de la efectividad de los dispositivos llamados de masas resonantes (tuned mass damper en inglés), considerando la IDSE. Se modeló una estructura de 12 pisos, cimentada sobre una cimentación rígida y con cuatro tipos de suelo de desplante; considerando velocidades de propagación de onda de corte de 100, 150, 200, 350  $m/s$  y la condición de base fija.

Algunos resultados se muestran en la Figura 13, donde en el eje x se grafica la relación de frecuencias de la masa resonante y la de estructura, se observa que la efectividad del sistema de masa resonante disminuye conforme el suelo es más blando. Es decir para una velocidad de propagación de onda de 100 m/s la reducción en desplazamiento por la masa resonante solo es del 10 %, y para la condición de base fija la reducción es del 40%. Este mismo porcentaje se observa en la reducción del cortante.



*Figura 13 Respuesta de la estructura base flexible  $R_{x1}$  desplazamiento,  $R_y$  aceleración y  $R_{Qb}$  cortante)  $\zeta = 1\%$  (tomada de Wu et al., 1999).*

## 2.3 Conceptos de Energía.

En este trabajo se calculó la energía de entrada que el sismo le induce al marco para cada tiempo, (la formulación completa se presenta en Chistopoulos y Filiatrault, 2006), donde obtienen a partir del balance de energía de la ecuación [1], la energía de entrada absoluta. Esta formulación incluye los movimientos de cuerpo rígido de la estructura, que se presentan cuando se considera la flexibilidad del sistema suelo cimentación (movimientos de cuerpo rígido de traslación y rotación). El cálculo tiempo a tiempo de la energía de entrada absoluta es a través de la expresión [17]

$$E_{in}^a(t) = E_{in}^a(t - \Delta t) - \frac{1}{2} \left( \left\{ \ddot{x}_a(t - \Delta t) \right\} + \left\{ \ddot{x}_a(t) \right\} \right)^T [M] \{r\} \left( \left\{ x_g(t) \right\} - \left\{ x_g(t - \Delta t) \right\} \right) \quad [17]$$



donde,  $E_m^a$  es la energía de entrada absoluta,  $\{\ddot{x}_a(t)\}$  es el vector de aceleraciones de la estructura y la del suelo en el tiempo  $t$ ,  $[M]$  es la matriz de masas de la estructura,  $\{r\}$  es un vector unitario y  $\{x_g(t)\}$  son los desplazamientos del suelo en el tiempo  $t$ .

Además si la relación de fuerza deformación del disipador es igual al de la Figura 9a, se puede calcular la energía que el disipador absorbe para cada tiempo con la ecuación [18]

$$E_a^i(t) = E_a^i(t - \Delta t) + \frac{1}{2} (F_r^i(t - \Delta t) + F_r^i(t)) (u^i(t) - u^i(t - \Delta t)) \quad [18]$$

donde,  $E_a^i$  es la energía que absorbe el disipador,  $F_r^i(t)$  y  $u^i(t)$  son la fuerza y deformación no lineal del elemento  $i$ , en el tiempo  $t$ .

## Capítulo 3 Modelación y Validación

### 3.1 Marco, contravientos, disipadores e IDSE

La modelación de estructuras civiles en software computacional ha permitido que se realicen distintos estudios, la correcta o errónea modelación repercute directamente en los resultados y conclusiones que se deriven de la investigación.

En los siguientes párrafos se explicará a detalle la modelación que se empleara en este trabajo, principalmente para el marco, los contravientos, el disipador de energía y las rigideces dinámicas del sistema suelo cimentación.

Para los análisis dinámicos paso a paso, se empleará el software computacional OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2006). Para el cálculo de las funciones de impedancia del sistema suelo cimentación se empleó el programa Dyna 6 (Novak, 2012).

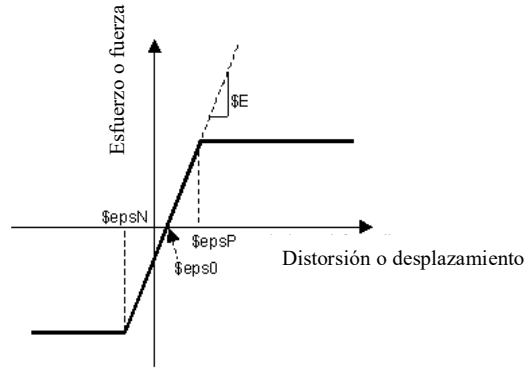
Los elementos columna y viga se modelaron a través de un elemento “elasticBeamColumn” que es parte de la librería de OpenSees. Una característica de este elemento es que el comportamiento del material solo es dentro del intervalo elástico. La rigidez de las columnas se calcula a partir de su geometría, las vigas se consideraron con una rigidez infinita. Con estas consideraciones se pretende que el modelo responda esencialmente como un marco de cortante.

Los contravientos se modelaron a través de “element truss”, considerando un comportamiento del material elástico, este elemento solo trabaja a cargas axiales.

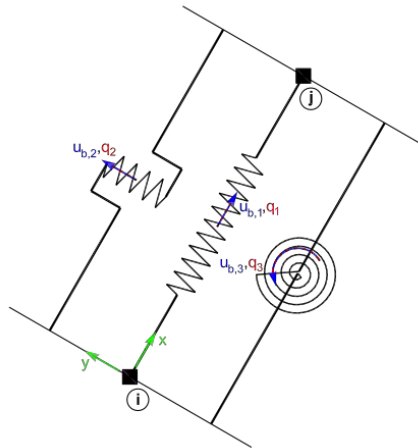
En cuanto al modelado del dispositivo disipador de energía se hizo a través de un “ZeroLength Element”, objeto que se define por dos nodos colocados en la misma ubicación, los nodos son conectados por materiales que representan la relación fuerza-deformación del disipador. El material que representa al disipador tiene un comportamiento elastoplástico perfecto, requiere de la rigidez y el desplazamiento de fluencia del disipador de energía como se muestra en la Figura 14. Cabe señalar que este elemento no considera la geometría del disipador, que sería importante en los casos donde se desea observar cómo evoluciona la fluencia del disipador.

El juego de resortes que simulan el sistema suelo cimentación se modela a partir de un elemento “twoNodeLink”, este elemento se define por dos nodos y puede tener o no longitud; se pueden asignar a varios grados de libertad simultáneamente. En este caso se considera que el sistema suelo cimentación puede desplazarse horizontalmente y además girar. El modelo

del juego de resortes que se obtienen de la librería de OpenSees se muestra en la Figura 15. El amortiguamiento del sistema suelo cimentación se modelara en el programa por un amortiguamiento equivalente de Rayleigh calculado con la ecuación [15].



**Figura 14 Material elastoplástico perfecto (Tomada de la librería de OpenSees).**



**Figura 15 Elemento twoNodeLink para simular las funciones de impedancia del sistema suelo cimentación (tomada de la librería de OpenSees).**

Como se reporta en las características del modelo se considera que toda la no linealidad se presente en el disipador de energía, dejando que los demás elementos estructurales trabajen en el intervalo elástico

Obviamente garantizar en un diseño formal que toda la linealidad se concentre en el disipador, es un tema aparte, y requeriría otros tipos de análisis. Como la finalidad de esta tesis es obtener la influencia de la flexibilidad del sistema de base, en el desempeño del disipador, las consideraciones aquí presentadas son suficientes.

En el estudio no se revisaron fuerzas de pandeo para los contravientos u otro tipo de falla, ya sea en los disipadores o elementos estructurales, que en un diseño formal se tienen que revisar.

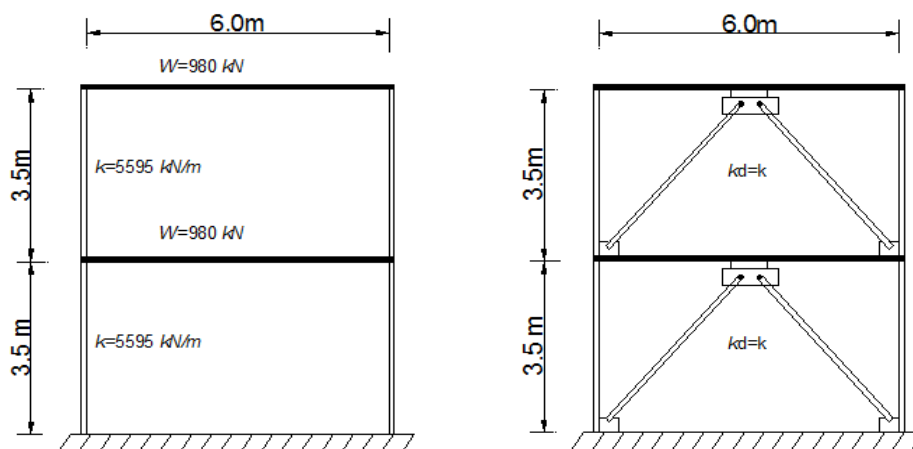
### 3.2 Validación del modelado de marcos con disipadores de energía sobre base rígida.

En la literatura se encuentran varios ejemplos de la respuesta de estructuras con disipadores de energía. Como parte de esta tesis se decidió realizar un modelo reportado en la literatura como calibración y validación de la modelación de estructuras con disipadores de energía en OpenSees.

Se modeló un marco reportado en Chistopoulos y Filiatrault, 2006. Es un marco simple de 2 niveles y una crujía (M2NSD), cuyos parámetros se muestran en la Figura 16. También se muestra un segundo modelo a base del mismo marco con un disipador por entrepiso montado sobre contraventeo tipo chevrón (M2NCD). La rigidez de los contravientos es igual a la rigidez que aportan las columnas de entrepiso. Para dichos marcos se considera la condición de base empotrada. Se reportan los periodos tanto del marco sin reforzar y el reforzado en la Tabla II

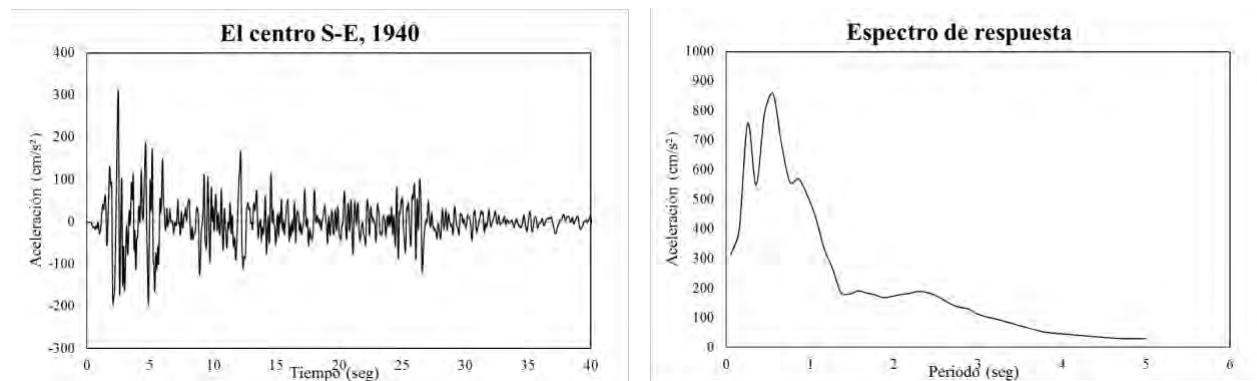
*Tabla II Periodos de los modelos M2NSD y M2NCD*

T(s) M2NSD			T(s) M2NCD		
Literatura	OpenSees	Mathcad	Literatura	OpenSees	Mathcad
1.35	1.3591	1.359	0.96	0.959	0.961

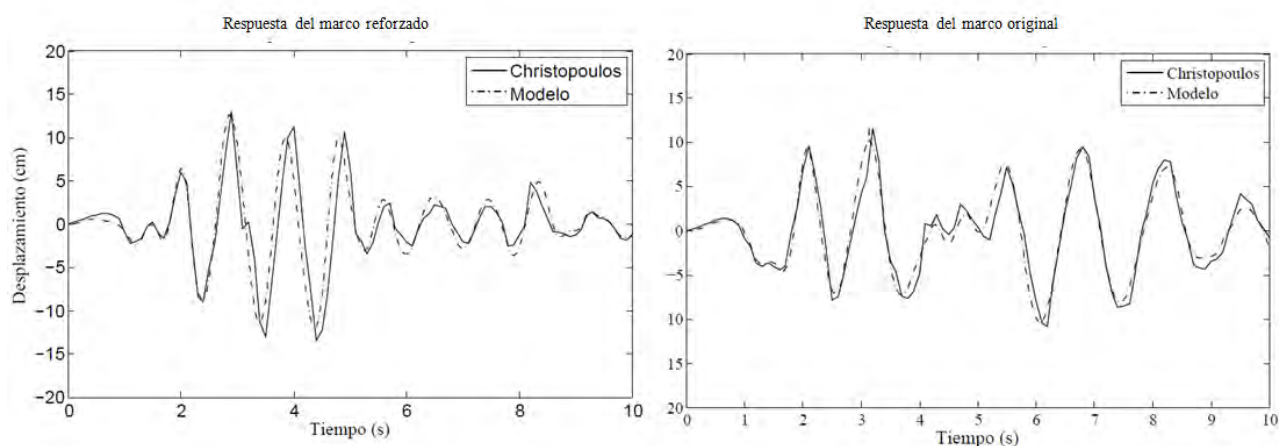


*Figura 16 Marco de 2 Niveles con y sin disipadores de energía*

Los modelos son sujetos a la componente S-E del sismo del centro de 1940 (Figura 17). Se muestra en la Figura 18 la historia de los desplazamientos del segundo nivel del marco, se compara la respuesta del modelo M2NSD y el modelo M2NCD.



**Figura 17** Aceleración y Espectro de respuesta del centro S-E, 1940.



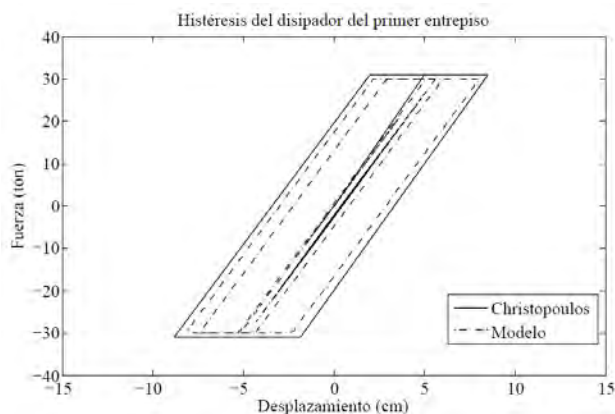
**Figura 18** Calibración de la respuesta de los modelos M2NSD y M2NCD

De los resultados de la Figura 18 se muestra que la respuesta de los modelos M2NSD y M2NCD (línea punteada) reproducen adecuadamente los resultados que reportan Christopoulos y Filiatrault (línea sólida), por lo que la calibración de marcos con disipadores de energía montados sobre contraviento chevron, sobre base fija, se puede considerar adecuada.

La Figura 19 muestra el comportamiento histórico del disipador del primer nivel obtenida del modelo M2NCD, comparado con la envolvente del ciclo histerético que se reporta en la

literatura. Nótese que la envolvente del comportamiento no lineal del disipador también se modeló adecuadamente con OpenSees.

Algo a notar de este ejercicio es que aunque se tiene la idea que el sistema contraviento disipador es benéfico a la respuesta de la estructura, se puede observar del espectro de aceleraciones, que en este caso en particular el rigidizar el marco con contravientos se traduce en aumentar las solicitaciones a la estructura debido al cambio del periodo. Cabe mencionar que la conveniencia de rigidizar una estructura radica en la relación del periodo fundamental y el periodo de sitio, resulta adecuado cuando el periodo fundamental es menor o igual que el periodo de sitio y resulta inadecuado cuando ocurre lo contrario; es por ello que el uso de los disipadores de energía se debe hacer con cautela, como lo han comentado varios autores en el pasado.



*Figura 19 Ciclo histérico del disipador del primer nivel del modelo M2NCD.*

### 3.3 Validación del modelado de la IDSE

Como ya se ha mencionado las rigideces dinámicas o funciones de impedancia varían en función de la frecuencia de excitación, pero para fines de esta tesis no se considerará esta variación, ya que los análisis son dinámicos no lineales en el dominio del tiempo y no de la frecuencia. En Avilés y Pérez-Rocha (2003) se explica que el análisis en el dominio del tiempo se pueden realizar, siempre y cuando se usen modelos para el sistema suelo cimentación independientes de la frecuencia, a través de resortes y amortiguadores constantes calculados como se indica en Wolf y Somaini (1986), con esta simplificación el procedimiento de integración de las ecuaciones de equilibrio se aplica como en el caso de base rígida. Para el cálculo de los valores de rigidez se evaluó con periodo fundamental de vibración con IDSE, como más adelante se explica.

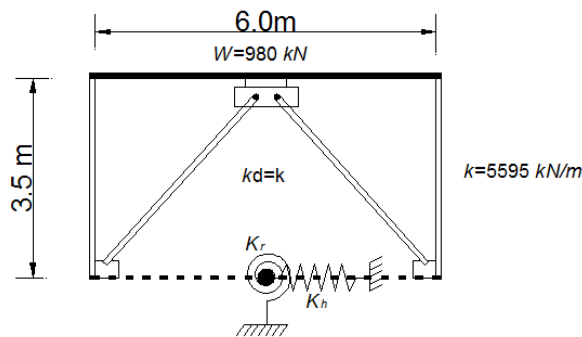
Para modelar la flexibilidad del suelo, se consideraron dos grados de libertad del sistema suelo cimentación (desplazamiento horizontal y rotación).

Como parte de este trabajo fue necesario calibrar y validar un modelo sencillo (Figura 20), que permitiera asegurar que el modelado de las funciones de impedancia fuera el correcto. Por lo que se compararon los resultados obtenidos en OpenSees con la solución reportada en Wolf 1985, la cual básicamente es la solución cerrada en términos de la función de transferencia, de un sistema de un grado de libertad con base flexible, la función de transferencia se presenta en la ecuación [19].

$$\frac{u}{u_g} = \frac{\frac{\omega^2}{\omega_o^2}}{1 + 2\zeta_i - \frac{\omega^2}{\omega_o^2} - \frac{\omega^2}{\omega_o^2} \left[ \frac{1 + 2\zeta_i}{1 + 2\zeta_{xi} + 2\zeta_{gi}} \right] - \frac{\omega^2}{\omega_o^2} \left[ \frac{1 + 2\zeta_i}{1 + 2\zeta_{\phi i} + 2\zeta_{gi}} \right]} \quad [19]$$

donde  $\frac{u}{u_g}$  es la función de transferencia,  $\zeta_i$  es el amortiguamiento de la estructura,  $\zeta_{xi}$ ,  $\zeta_{gi}$ , y  $\zeta_{\phi i}$ , son el amortiguamiento del suelo y  $\omega$  y  $\omega_o$  son las frecuencias de excitación y de la estructura.

La primera parte de la calibración de la respuesta del marco con IDSE fue considerando que los valores de la rigideces dinámicas tenían un valor extremadamente alto, simulando una base indeformable. En la segunda parte se calcularon los valores de la rigideces dinámicas, equivalentes a un sistema de cimentación de una losa y una velocidad de propagación de onda del suelo  $V_s=100 \text{ m/s}$ , simulando esta condición una base deformable.



**Figura 20 Marco de calibración con IDSE.**

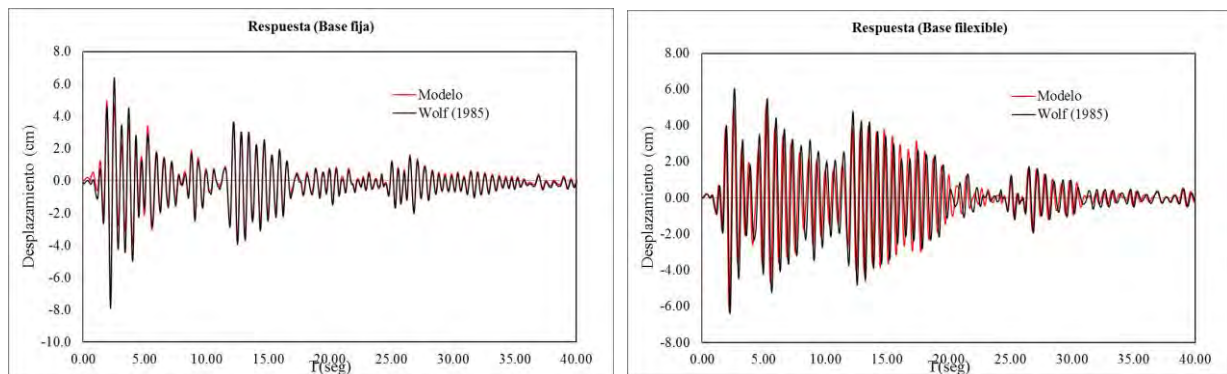
Una primera prueba a este modelo fue comparar los periodos que arroja el modelo en OpenSees y los calculados con la fórmula [14] propuesta en las NTC-Sismo (NTCS, 2004). El periodo para base fija en OpenSees y el de NTC son  $T_1=0.589s$  y  $T_2=0.59s$ ,

respectivamente. Los periodos con IDSE son 0.669s y 0.67s; se puede observar que el modelo en OpenSees arroja buenos resultados en cuanto a la estimación del periodo modificado por la flexibilidad del suelo.

Se muestra también la comparación de la respuesta en términos del desplazamiento total de la estructura calculada con el modelo en OpenSees y la calculada con la metodología planteada en Wolf 1985, en base al método de la respuesta compleja en la frecuencia (Figura 21).

Una primera diferencia que salta al considerar la flexibilidad del suelo en el análisis se ve reflejada en la Figura 21, donde se aprecia que los desplazamientos sobre base flexible son mayores a los de base fija. Este incremento en los desplazamientos se debe a dos grandes razones, uno principalmente a que el sistema en conjunto se flexibiliza al considerar la IDSE y dos, a que este incremento se debe al cambio en nivel de aceleraciones al que está sujeta la estructura, debido al alargamiento del periodo con IDSE.

Esta modificación de los desplazamientos laterales de la estructura ya se toma en cuenta en las NTC-Sismo a través de la ecuación [16].



**Figura 21 Desplazamientos del modelo de base fija y con IDSE, obtenida con el modelación en OpenSees y la metodología de Wolf (1985).**

La pequeña diferencia entre las respuestas del modelo y la respuesta obtenida usando la metodología de Wolf se puede asociar al planteamiento distinto, ya que Wolf, considera un sistema de un grado de libertad, donde solo en un punto se concentra la masa, y el modelo de OpenSees es un marco donde la masa se concentra varios puntos del primer nivel; pero la calibración del modelado en OpenSees se puede considerar adecuada.



### 3.4 Ejemplo del modelado en OpenSees de un marco de un nivel reforzado con disipadores de energía considerando la IDSE.

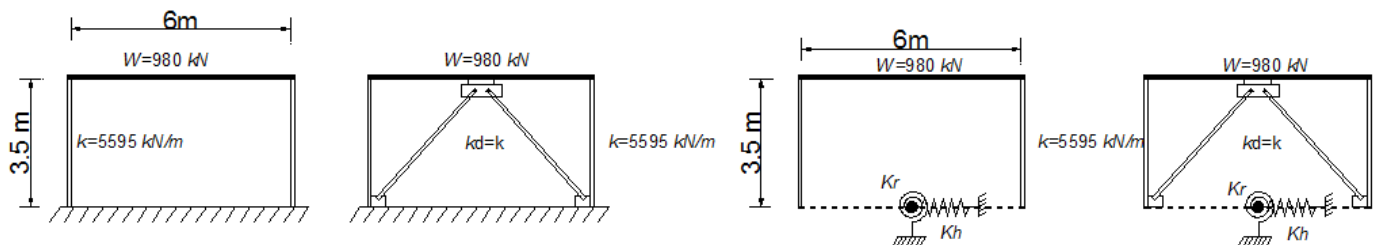
Generalmente muchas estructuras sometidas a un sismo de magnitud moderada o intensa pueden sufrir daño. Después de la evaluación respectiva, se puede optar por reforzar el sistema estructural, y una opción bastante usada, es el refuerzo a través de contravientos y disipadores de energía.

Para demostrar la efectividad que tiene este tipo de refuerzo sobre distintas condiciones de apoyo se realizaron los siguientes dos casos de estudio, se modeló un marco de un nivel con y sin disipadores, sobre base rígida (Figura 22a) y sobre base flexible (Figura 22b), los cuales fueron excitados con el sismo del Centro, 1940.

Se obtuvo la efectividad del dispositivo disipador de energía sobre las dos condiciones de apoyo. Para el modelo con IDSE, los valores de la rigideces del sistema suelo cimentación, usadas en este ejemplo son los que se muestran en la Tabla III, que se calcularon, en este caso sencillo con las ecuacion [10]. El valor proporcional de la rigidez dinamica para analisis en dos dimensiones, se toma en cuenta diviendo, la rigidez dinamica de una cimentacion tridimensional entre el numero de marcos que resisten el cortante actuando en la base.

*Tabla III Rigideces del sistema suelo cimentación del Marco de 1 nivel*

Modelo	$K_r (t - cm)$	$K_h (t / cm)$
M1	7.0849E5	1.7665E6



*Figura 22 Marco de un nivel con y sin disipadores, a) base rígida y b) base flexible.*

Los periodos del marco sin refuerzo, sin y con IDSE son  $T = 0.84s$  y  $T = 1.18s$ , el periodo de los marcos reforzados es  $T_r = 0.6s$  y  $T_r = 1.02s$ , para los mismos casos.

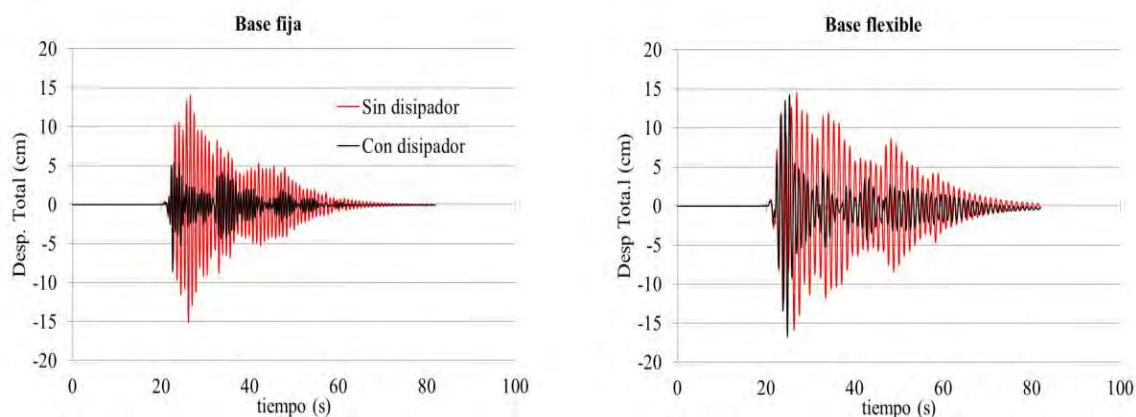
Se muestran los desplazamientos totales para ambos casos de estudio en la Figura 23, donde se observa el efecto de reducción de la respuesta al rigidizar la estructura con el sistema contraviento disipador, tanto para base fija y para base flexible.

Se calculó el porcentaje de reducción de la respuesta, sobre base fija, los desplazamientos se reducen en un 62% y sobre base flexible los desplazamientos se reducen en un 42%, a partir de este resultado se puede notar que para este caso de estudio, la efectividad de rigidizar el sistema es menor si se considera la IDSE.

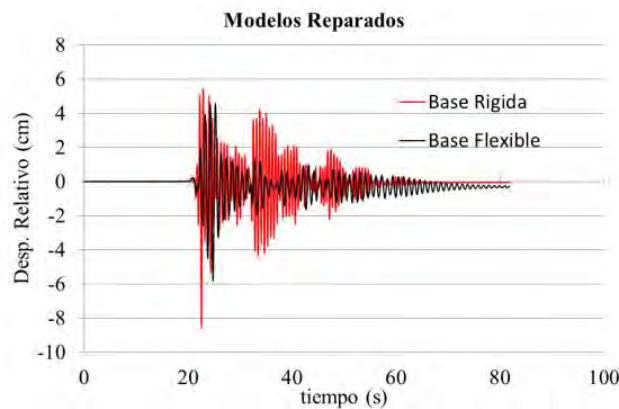
Se puede observar en la Figura 23 que el desplazamiento total de la estructura es mayor para el caso con IDSE. Este incremento se puede explicar, si consideramos que sobre base fija el desplazamiento solo se debe a la deformación de la estructura, en cambio con base flexible, el desplazamiento total se debe a la deformación de la estructura y a los movimientos de cuerpo rígido de la cimentación (horizontal y cabeceo).

En la Figura 24 se muestran los desplazamientos relativos de la estructura de los modelos reforzados. Para el modelo con IDSE se restó al desplazamiento total, los desplazamientos de cuerpo rígido de la cimentación, se nota que los desplazamientos relativos del marco son menores para el caso de base flexible.

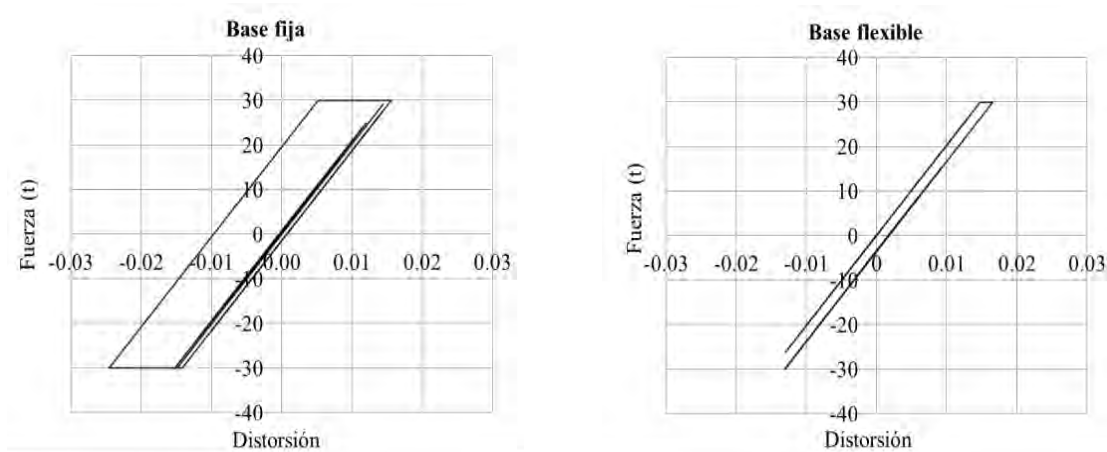
También se muestra en la Figura 25 el comportamiento histerético del disipador de marco reforzado, donde se nota una menor eficiencia del disipador en base flexible. En este caso la reducción en eficiencia se puede deber a dos factores, uno al nivel de aceleración al que está sujeta la estructura reforzada y dos, a una posible disminución de las distorsiones de entrepiso debidas a la IDSE.



**Figura 23 Desplazamientos total del marco de 1 nivel sobre base fija y base flexible, sin y con refuerzo**

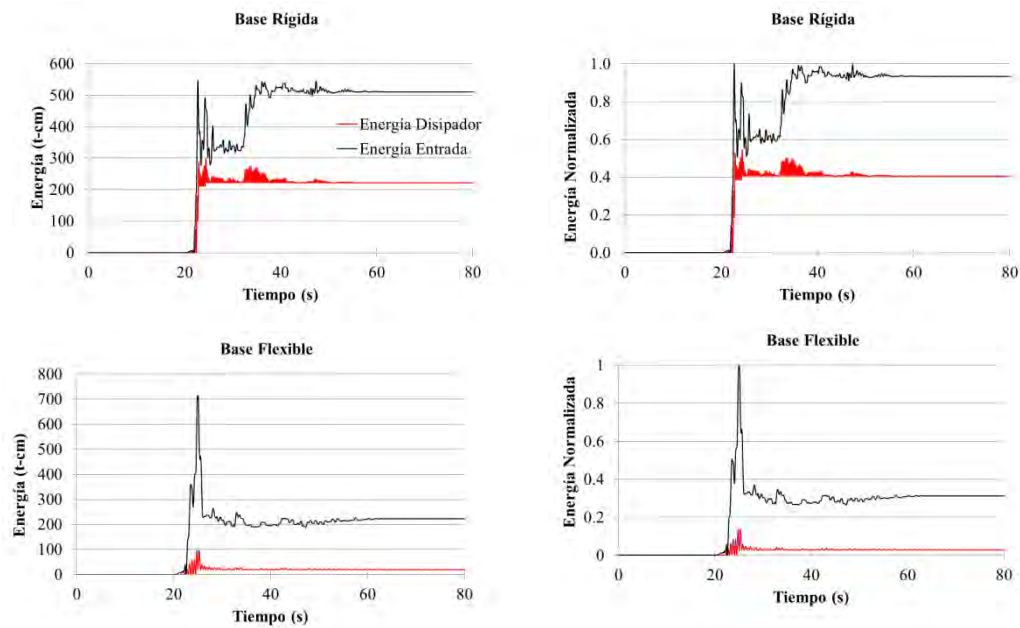


**Figura 24** Desplazamiento relativo de entresuelo de los modelos reparados, sobre base fija y base flexible.



**Figura 25** Comportamiento histerético del disipador del modelo sobre base fija y base flexible

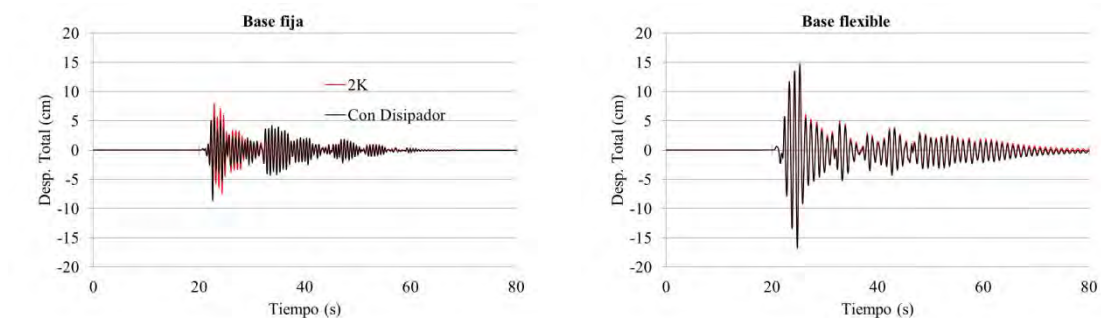
En la Figura 26 se muestra la energía absoluta que el sismo del Centro le induce al marco de un nivel reforzado, sobre base fija y sobre base flexible, calculadas con la ecuación [17]. También se muestra la energía que el disipador absorbe. Además, se muestra la energía normalizada, donde se observa que el disipador sobre base fija absorbe alrededor del 40% de la energía de entrada, mientras que para el modelo en base flexible el disipador absorbe solamente un 10% de la energía de entrada.



**Figura 26** Energía de entrada y energía que absorbe el disipador para base fija y base flexible, para el marco de un nivel reforzado.

### 3.5 Marco de un nivel concebido inicialmente con disipadores

Una variación del análisis anterior, es que la rigidez del marco con contravientos es el doble que la del marco sin disipadores. Se hizo un análisis del marco sin refuerzo considerando una doble rigidez en las columnas, para que la comparación en términos de rigidez con el modelo con contravientos sea igual. Los resultados se muestran en la Figura 27.



**Figura 27** Comparación de la respuesta de un marco de un nivel sin refuerzo y un marco de un nivel con disipadores, con periodos de vibrar similares.

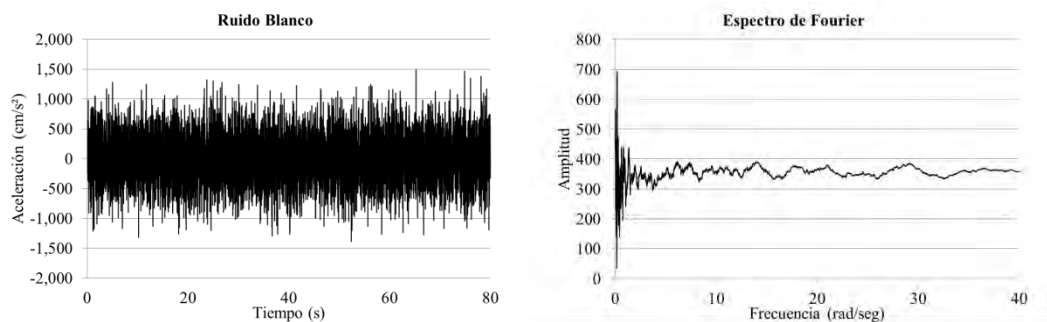
Como conclusión de la Figura 27 es que en este caso no existe diferencia, ya que en términos de rigidez es el mismo sistema con diferente configuración estructural. Aunque existe una ligera diferencia en base fija debido a que el dissipador del modelo reforzado, ya fluyó y el de base flexible no.

### 3.6 Análisis del marco de un nivel con ruidos blancos

Se mencionaba que la diferencia de respuestas entre base flexible y rígida se debe entre otros factores a el nivel de aceleraciones a las que se sujeta la estructura debido al cambio del periodo. Esta problemática queda más clara si pensamos en un edificio de diez niveles, por mencionar un ejemplo, cuyo periodo de vibración natural es aproximadamente de un segundo, al rigidizar el marco con contravientos, el periodo disminuye, y el nivel de aceleraciones cambia, por ejemplo en la Figura 17, se observa que este cambio del periodo se refleja en un aumento en las aceleraciones a las que se sujeta la estructura; si además consideramos la IDSE dentro del análisis, implicaría un alargamiento en el periodo, ligada a un nuevo cambio en el nivel de aceleración que se sujeta el edificio.

Para evitar que la excitación influya en nuestros resultados, se planea usar un ruido blanco cuyo nivel de aceleraciones casi permanezca constante, como el que se muestra en la Figura 28.

El espectro de Fourier muestra claramente que casi todas las amplitudes se mantienen constantes para todas las frecuencias, por lo que el nivel de aceleración no es factor en el análisis.



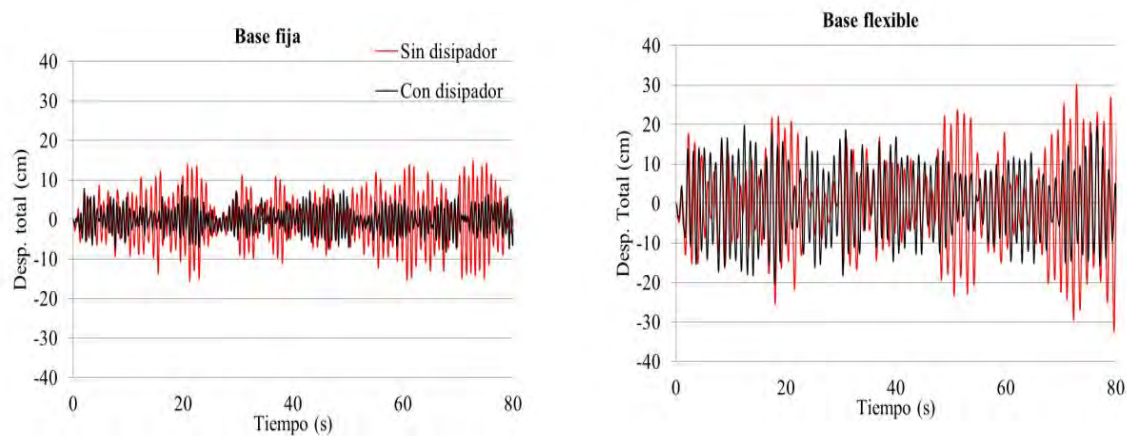
*Figura 28 Ruido blanco y espectro de Fourier para el marco de 1 nivel*

Se observa en la Figura 29 que el desplazamiento máximo es mayor en base flexible que en base fija, esto debido a los movimientos de cuerpo rígido. También se observa la reducción de la respuesta debido al refuerzo contraviento disipador.

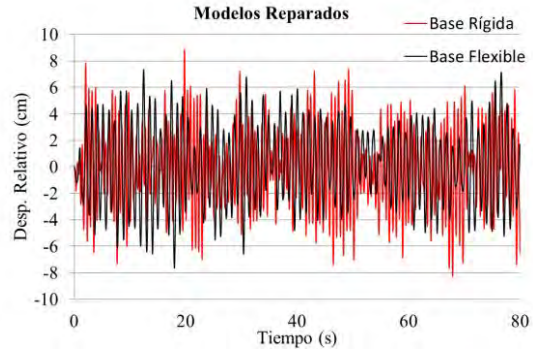
Se calculó el porcentaje de reducción de la respuesta, sobre base fija los desplazamientos se reducen en un 50% y sobre base flexible los desplazamientos se reducen en un 20%, es curioso que los valores resulten similares a los obtenidos con el sismo del centro. En este caso se puede decir, que la reducción de los desplazamientos con IDSE no se debe al cambio del nivel de aceleración; si no que es un efecto relacionado a la IDSE.

En la Figura 30 se observa el desplazamiento sin movimientos de cuerpo rígido para base fija y base flexible, se nota que el desplazamiento relativo del modelo con base flexible es ligeramente menor a los desplazamientos de base fija; en otras palabras, aunque ambos modelos están sujetos a un nivel similar de aceleración, el modelo con IDSE presenta menos distorsiones de entrepiso.

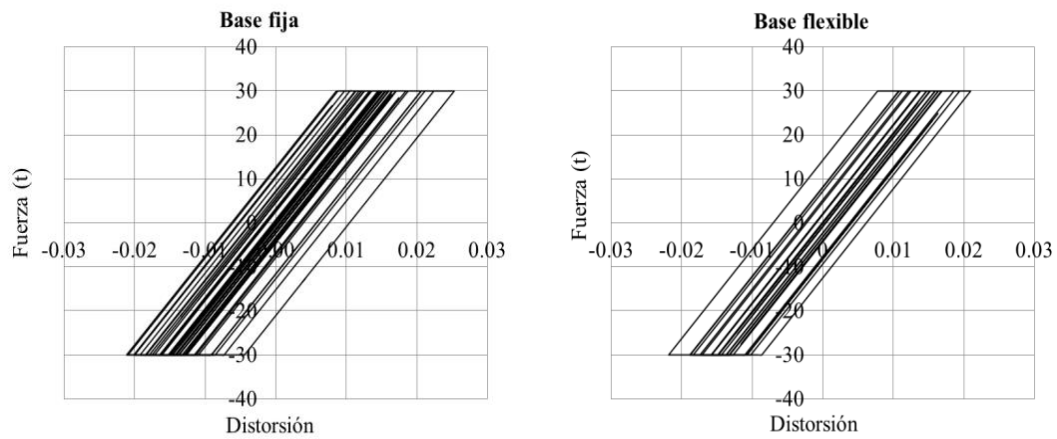
Al tener menos distorsión o desplazamiento relativo de entrepiso, el disipador de energía trabaja en menor cantidad como se puede apreciar en la Figura 31. Donde los ciclos histeréticos del modelo en base flexible son ligeramente más chicos que el modelo sobre base fija.



**Figura 29 Desplazamiento total del marco de 1 nivel sobre base fija y base flexible, sin y con refuerzo, sometido a un ruido blanco.**



**Figura 30** Desplazamiento relativo de entrepiso de los modelos reparados, sobre base fija y base flexible, sometidos a ruido blanco.



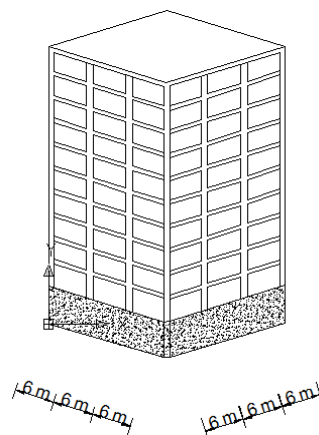
**Figura 31** Ciclos histeréticos del disipador del marco de un nivel sobre base fija y base flexible, sometidos a ruido blanco.

## Capítulo 4 Análisis dinámico paso a paso de marcos con disipadores de energía, considerando la IDSE.

### 4.1 Descripción del modelo de 10 niveles sin refuerzo y con refuerzo.

En el manual de obras civiles de la CFE del 93 se propone un edificio de concreto de 10 niveles con geometría y estructuración regular. El sistema estructural es a base de marcos de concreto. Los datos que se proporcionan son las rigideces por entrepiso, las cuales para esta tesis se modificaron ligeramente, con la idea de obtener dimensiones de columnas homogéneas lo mayor posible. La altura de entrepiso del edificio es de 3.5 metros en la planta baja y de 3m en los demás pisos. La estructura cuenta con tres crujeas por cada dirección como se puede observar en la Figura 32

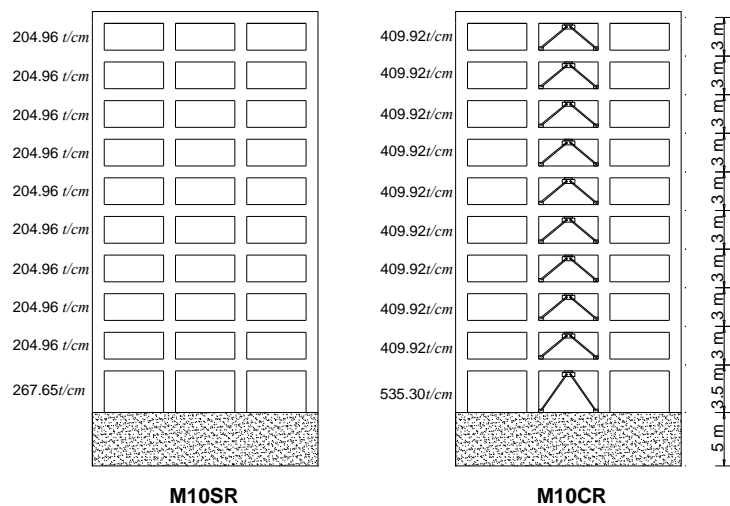
Del edificio de 10 niveles se tomó un marco interior para los análisis que se llevaran a cabo en este trabajo. Las rigideces de entrepiso se muestran en la Figura 33. Como el marco no contaba con un sistema de contravientos necesarios para montar los disipadores de energía, se reforzó la estructura con un sistema de contravientos-disipador (Figura 33), el cual aporta el 50 % de la rigidez por entrepiso; en este caso se considera que el sistema de contravientos aporta la misma rigidez de entrepiso que el marco, aunque pueden existir otras combinaciones de aportación de rigidez que están siendo estudiadas por algunos autores.



*Figura 32 Edificio de concreto propuesto en el manual de obras civiles de la CFE del 93*

Con propósitos de modelado se presentan en la Tabla IV las dimensiones de las columnas del marco, así como las áreas de los contravientos utilizados.





**Figura 33 Marco de 10 niveles sin refuerzo y Marco de 10 niveles con refuerzo (MSR y MCR)**

**Tabla IV Dimensiones de columnas de entrepiso y Área de contravientos**

Nivel	Lado columnas ( cm )	Área contravientos ( cm <sup>2</sup> )
1	60.0	69.36
2	50.0	41.41
3	50.0	41.41
4	50.0	41.41
5	50.0	41.41
6	50.0	41.41
7	50.0	41.41
8	50.0	41.41
9	50.0	41.41
10	50.0	41.41

El comportamiento no lineal del disipador de energía es similar al que se muestra en la Figura 9a. Es un comportamiento elastoplástico perfecto. El peso de cada uno de los entrepisos del edificio es de 324 toneladas, por áreas tributarias se consideró que el peso por entrepiso actuando en el marco interior es de 108 toneladas.

Las fuerzas de fluencia del disipador se calcularon con la metodología que se presenta en Chistopoulos y Filiatrault, 2006, donde las fuerzas de fluencia se obtuvieron conforme a la ecuación [2.7], la aceleración máxima del suelo fue la correspondiente al registro SCT de

sismo de 1985 en México, donde  $\frac{a_g}{g} = 0.16$ . Para cada disipador se muestra la fuerza y deformación de fluencia en la Tabla V.

**Tabla V Fuerzas de fluencia para los dispositivos disipadores de energía**

Nivel	$F_{lat}$ (ton)	$\xi_y$
1	270	1.007
2	243	1.191
3	216	1.058
4	189	0.926
5	162	0.794
6	135	0.662
7	108	0.529
8	81	0.397
9	54	0.265
10	27	0.132

## 4.2 Descripción de la cimentación, suelos de estudio y cálculo de las funciones de impedancia.

El edificio cuenta con una cimentación de cajón rígido con un nivel de desplante de cinco metros debajo del nivel natural del suelo. El cajón tiene dimensiones en planta de 18 x 18 metros, el cual consideramos que a su vez se desplanta sobre un suelo homogéneo.

El suelo homogéneo se puede caracterizar por la velocidad de propagación de onda de cortante  $V_s$ . En este trabajo se usaron suelos que se han empleado en otros estudios (Carbonari *et al.*, 2011), agregando un caso adicional, con características representativas a una arcilla de la ciudad de México; las propiedades de estos se muestran en la Tabla VI.

En las Figuras 34 a 37 se muestran las variaciones de las funciones de impedancia en el dominio de la frecuencia, tanto la parte real (rigidez horizontal y rotacional del sistema suelo cajón) como la parte imaginaria (amortiguamiento horizontal y rotacional del sistema suelo cajón), en estas gráficas se observa como varía las funciones de impedancia en función de la frecuencia.

*Tabla VI Propiedades de los suelos en estudio*

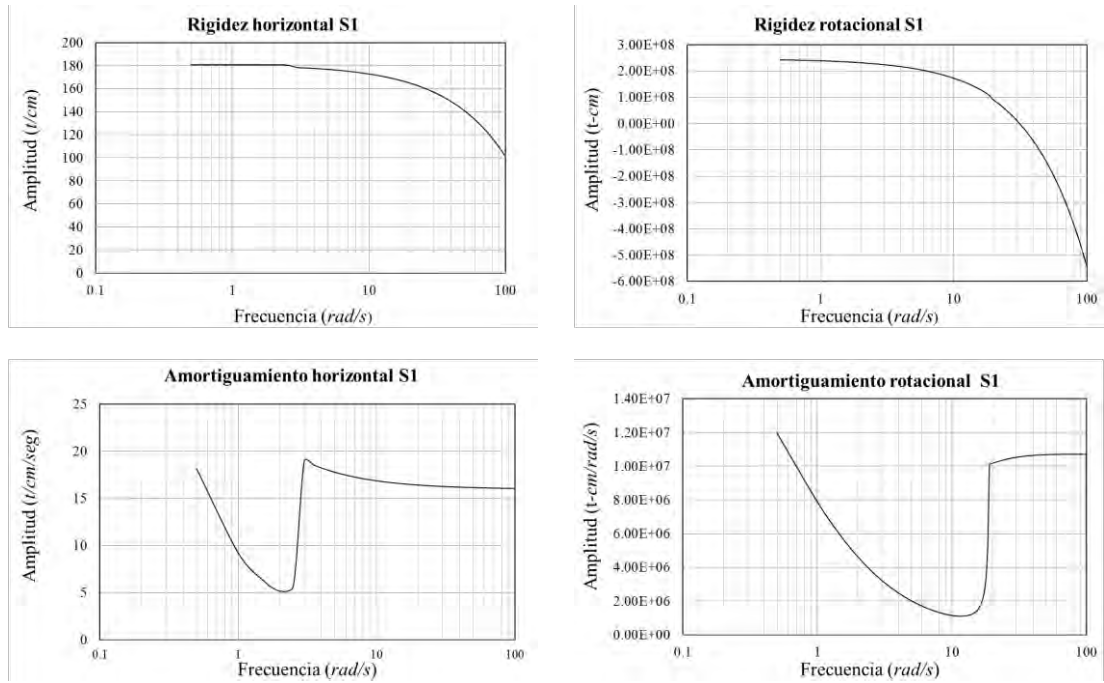
Suelo	$V_s (m/s)$	$\rho_s (ton/m^3)$	$\nu$
<b>S1</b>	69	1.6	0.49
<b>S2</b>	100	1.6	0.49
<b>S3</b>	250	1.6	0.49
<b>S4</b>	400	1.8	0.49

En el caso aquí estudiado, se usará sólo un valor puntual de la función de impedancia, asociada a la primera frecuencia de vibración de la estructura modificada con IDSE. Para ello se realizó un proceso iterativo, ya que inicialmente se desconoce el valor de la función de impedancia y el valor de la frecuencia modificada por IDSE, el proceso que se describe a continuación: inicialmente, a partir de la frecuencia fundamental sobre base fija, se buscó el valor de la rigidez dinámica horizontal y rotacional correspondiente, con estos valores se obtuvo el valor de la frecuencia con IDSE a partir de la ecuación [14], se vuelve a repetir el proceso pero ahora partiendo del nuevo valor de frecuencia, hasta que los valores de frecuencia con IDSE converjan; este proceso se realizó para los cuatro suelos en estudio. Los valores de las rigideces dinámicas se muestran en la Tabla VII. Se puede observar que mientras más blando es el suelo los valores de las funciones de impedancia son más pequeños.

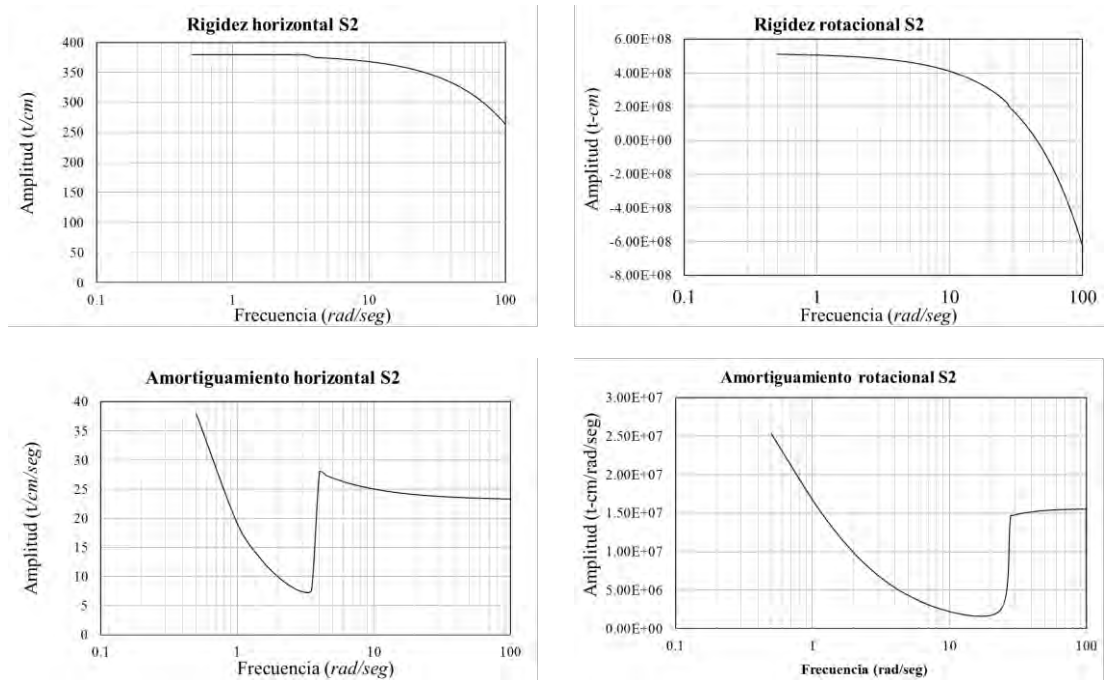
El amortiguamiento equivalente es calculado con la ecuación [15], para cada suelo, su valor, se muestra en la Tabla VIII.

*Tabla VII Valores de rigideces horizontal y rotacional para los distintos suelos y modelos.*

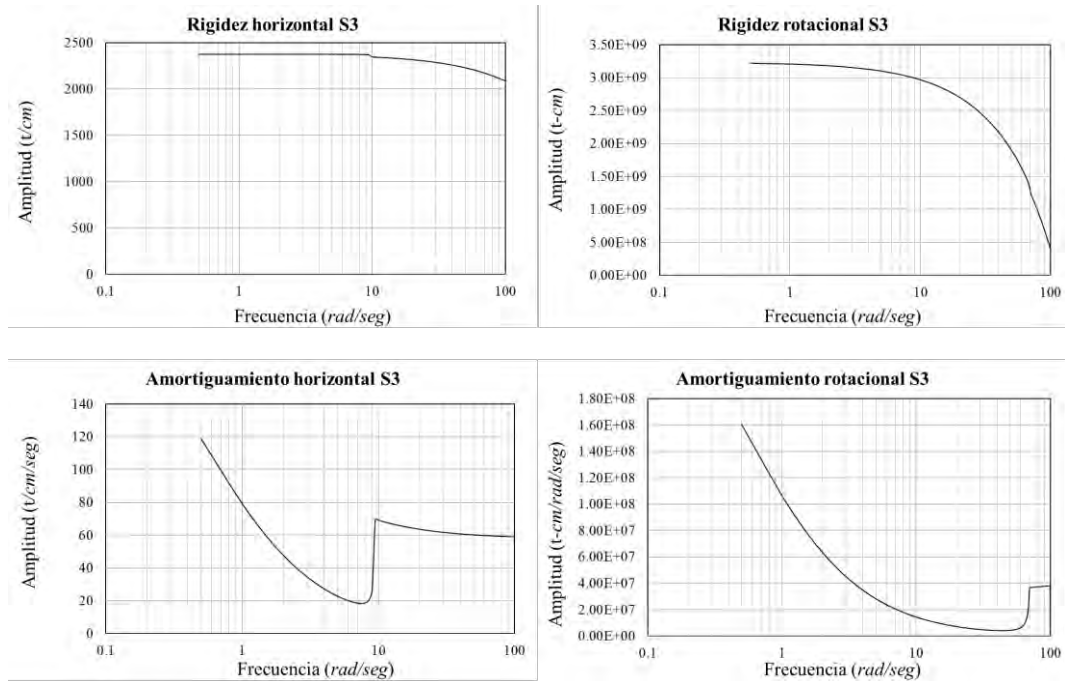
Suelo	$K_r (t - cm)$	$K_h \left( \frac{t}{cm} \right)$
<b>S1</b>	2.085E8	1.766E2
<b>S2</b>	4.503E8	3.720E2
<b>S3</b>	3.020E9	2.370E3
<b>S4</b>	8.910E9	6.830E3



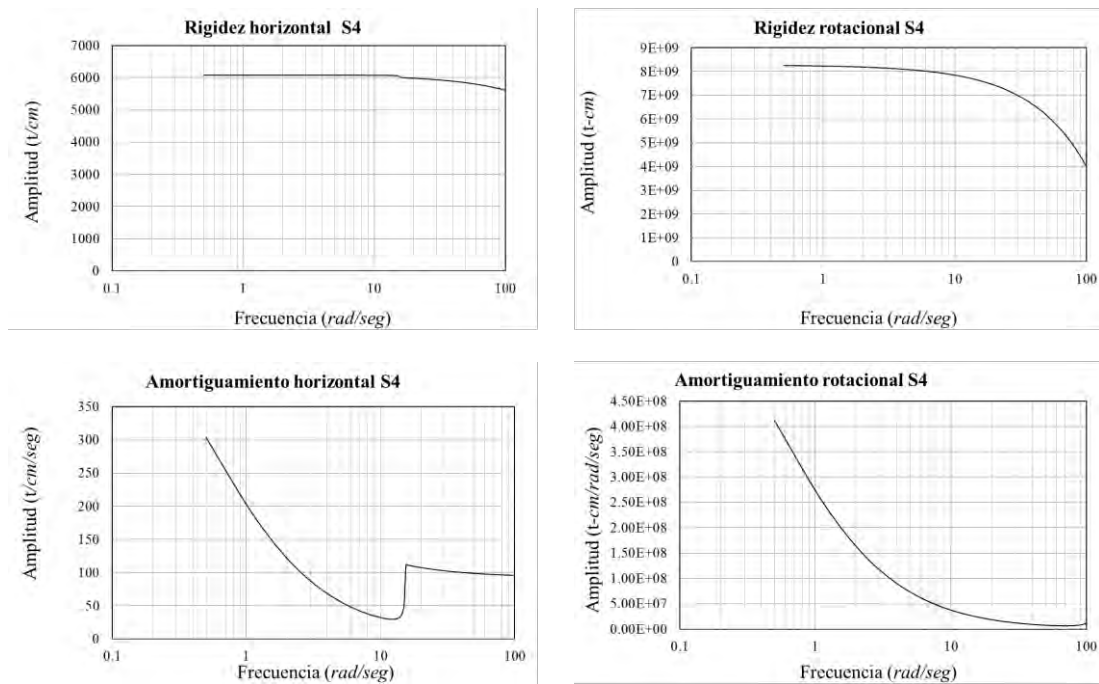
**Figura 34 Funciones de impedancia para  $V_s = 69 \frac{m}{s}$**



**Figura 35 Funciones de impedancia para  $V_s = 100 \frac{m}{s}$**



**Figura 36 Funciones de impedancia para  $V_s = 250 \frac{m}{s}$**



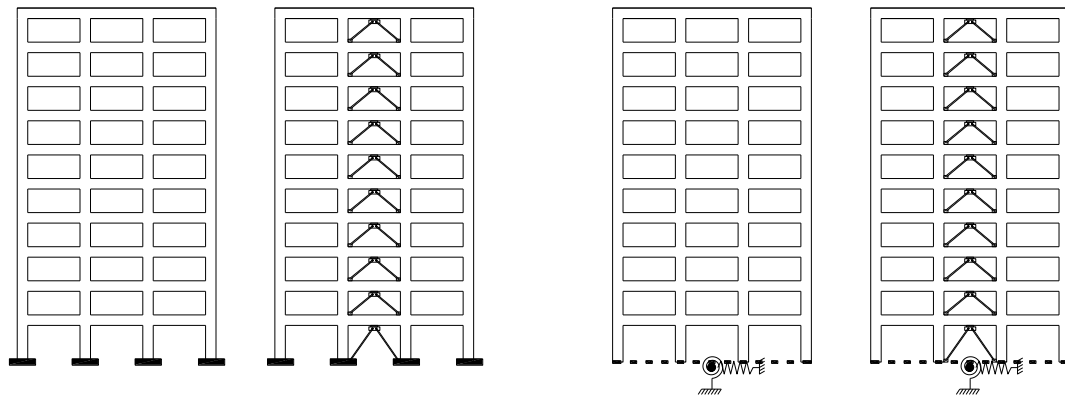
**Figura 37 Funciones de impedancia para  $V_s = 400 \frac{m}{s}$**

**Tabla VIII Amortiguamiento de los distintos suelos y grados de libertad y amortiguamiento equivalente**

Suelo	$\zeta_r$ (%)	$\zeta_h$ (%)	$\zeta_e$ (%)
<b>S1</b>	0.23	25.6	4.6
<b>S2</b>	2.6	22.1	4.9
<b>S3</b>	2.5	3.1	4.6
<b>S4</b>	2.5	2.6	4.9

Como se observa en la última columna de la Tabla VIII, en este caso, el amortiguamiento casi no se ve afectado por la flexibilidad del sistema suelo-cajón, ya que inicialmente se considera que la estructura posee un 5% de amortiguamiento crítico, por lo que se decidió tomar 5% de amortiguamiento crítico para todos los casos de estudio.

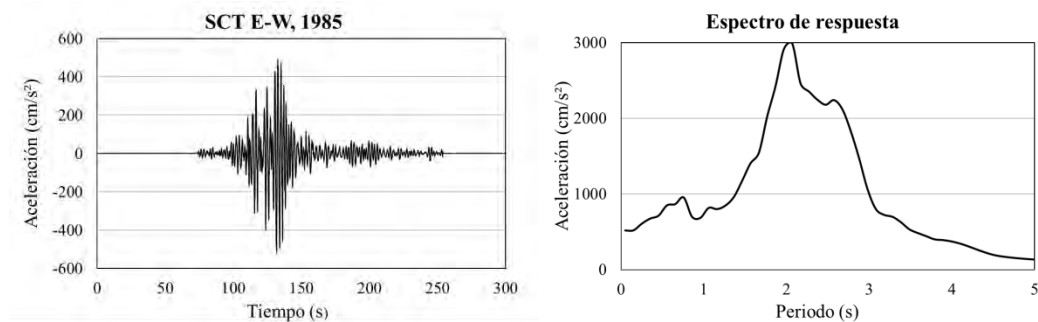
Definidos los principales parámetros de esta investigación, es prudente hacer un resumen de los modelos de marcos que se van a analizar. Se analizó un modelo de un marco sin refuerzo sobre base fija (MSR-BR), el mismo marco reforzado con disipadores de energía (MCR-BR), y se analizarán los mismos marcos con refuerzo y sin refuerzo sobre los distintos suelos (MSR-S1, MSR-S2, MSR-S3, MSR-S4 y MCR-S1, MCR-S2, MCR-S3, MCR-S4) (Figura 38). Además, se decidió hacer un modelo más donde se considera que el sistema suelo cimentación proporciona un amortiguamiento equivalente del 20%, ya que se ha observado que existen sistemas de suelo cimentación que pueden llegar a proporcionar estos niveles de amortiguamiento. Los modelos serían MSR-S120a y MCR-S120a.



**Figura 38 Marcos de 10 niveles con y sin refuerzo, sobre base rígida y base flexible.**

### 4.3 Marco sujeto a SCT E-W, 1985.

Se obtuvo de la base mexicana de sismos fuertes (SMIS, 2001) el registro de suelo blando de SCT E-W, 1985. El registro se escaló a una aceleración máxima  $a_g = 520 \text{ cm/s}^2$  para garantizar que todos los disipadores fluyeran. En la Figura 39 se muestra el registro y el espectro de aceleraciones de SCT-85 escalados; la forma en que se escaló el registro, fue multiplicando las aceleraciones por un factor para obtener la aceleración máxima objetivo.



*Figura 39 Registro y espectro escalado de la estación SCT-85*

Los periodos para los modelos de 10 niveles se muestran en la Tabla IX, donde se observa que al rigidizar la estructura con contravientos, reduce el periodo, pero al considerar la IDSE el periodo se alarga, esto lleva en un inicio a que la estructura se sujete a diferentes niveles de aceleración del suelo

*Tabla IX Periodos del marco de 10 niveles*

Modelo	$T(s)$
MSR-BR	1.00
MSR-S4	1.02
MSR-S3	1.04
MSR-S2	1.20
MSR-S1	1.42
MCR-BR	0.74
MCR-S4	0.75
MCR-S3	0.78
MCR-S2	1.00
MCR-S1	1.23

En las Figuras 40 a 42 se muestran las reducciones de desplazamientos totales tiempo a tiempo del primer, quinto y último nivel del marco, debido al refuerzo contraviento-disipador, para las distintas condiciones de apoyo. Se calculó el porcentaje del promedio de reducción de la respuesta en el tiempo, así como la reducción del desplazamiento máximo, los resultados se muestran en la Tabla X.

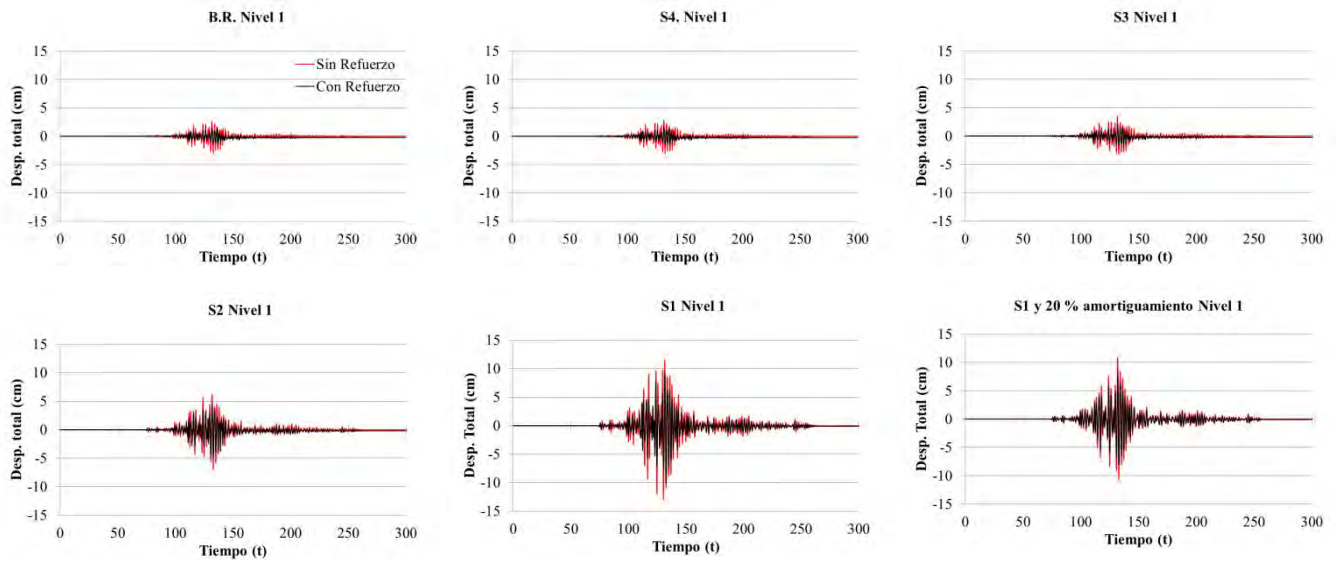
El cálculo del porcentaje del promedio de reducción de la respuesta en el tiempo, se obtuvo, primero calculando el promedio de desplazamientos sin contravientos a través de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del desplazamiento en cada tiempo, lo mismo se hace para el modelo con contravientos, y a partir de estos resultados se calcula el porcentaje de reducción debido al refuerzo con el sistema contraviento-disipador.

Se observa de la tabla X como en base rígida en el primer nivel, los desplazamientos máximos se reducen en un 51%, pero al tomar en cuenta la IDSE el desplazamiento máximo se puede llegar a reducir en algunos casos alrededor del 25%. En general en la tabla X se observa un decremento de la eficiencia del refuerzo, en cuanto a la disminución de las solicitaciones máximas y promedio, al considerar la flexibilidad de la base.

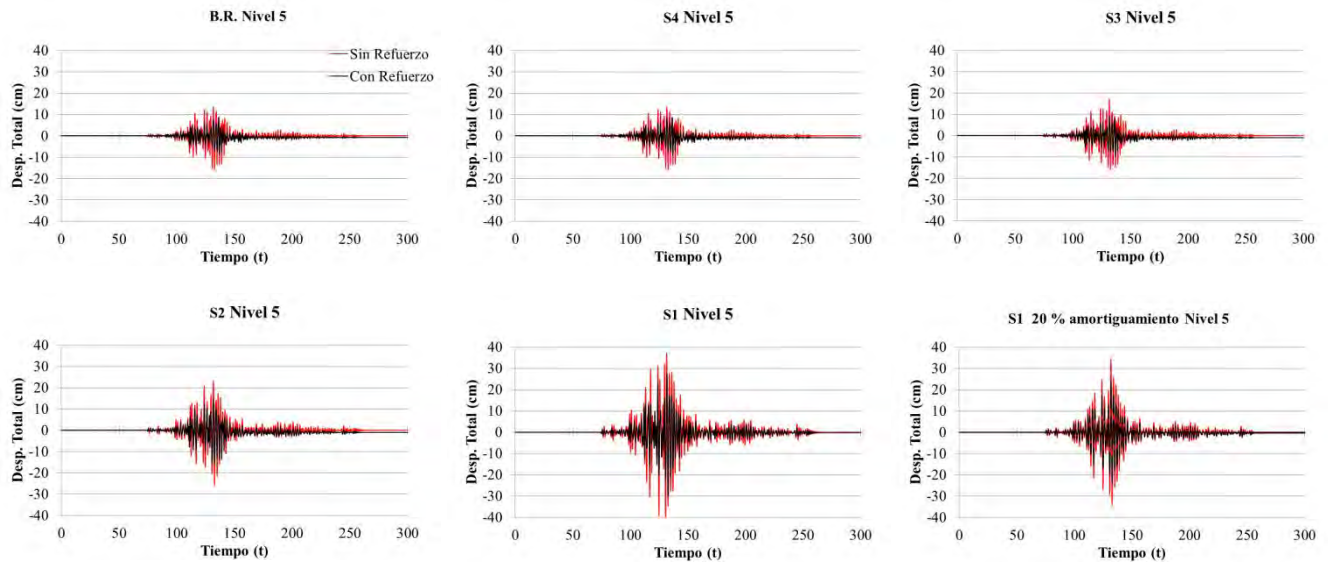
*Tabla X Porcentaje reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (SCT-85).*

	NIVEL 1		NIVEL 5		NIVEL 10	
Apoyo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
<b>BR</b>	36	51	43	45	44	37
<b>S4</b>	35	48	39	42	41	34
<b>S3</b>	37	43	40	39	41	30
<b>S2</b>	29	32	34	39	33	35
<b>S1</b>	28	21	35	27	33	26
<b>S1 y 20 <math>\zeta_{eq}</math></b>	23	22	31	28	30	27

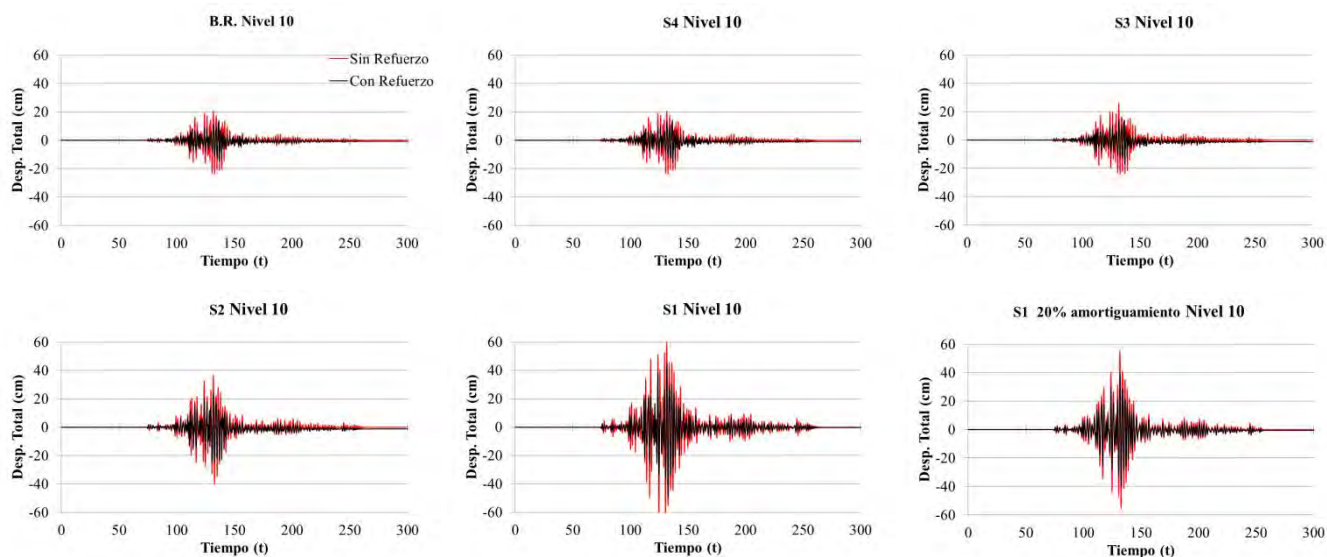




**Figura 40** Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).



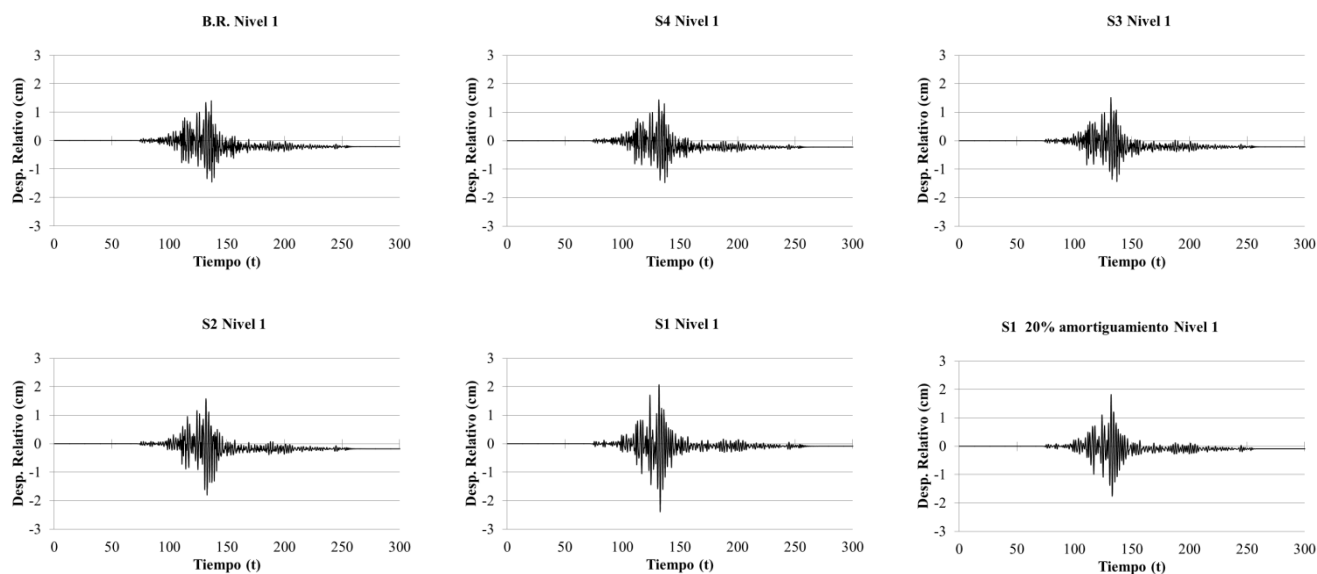
**Figura 41** Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).



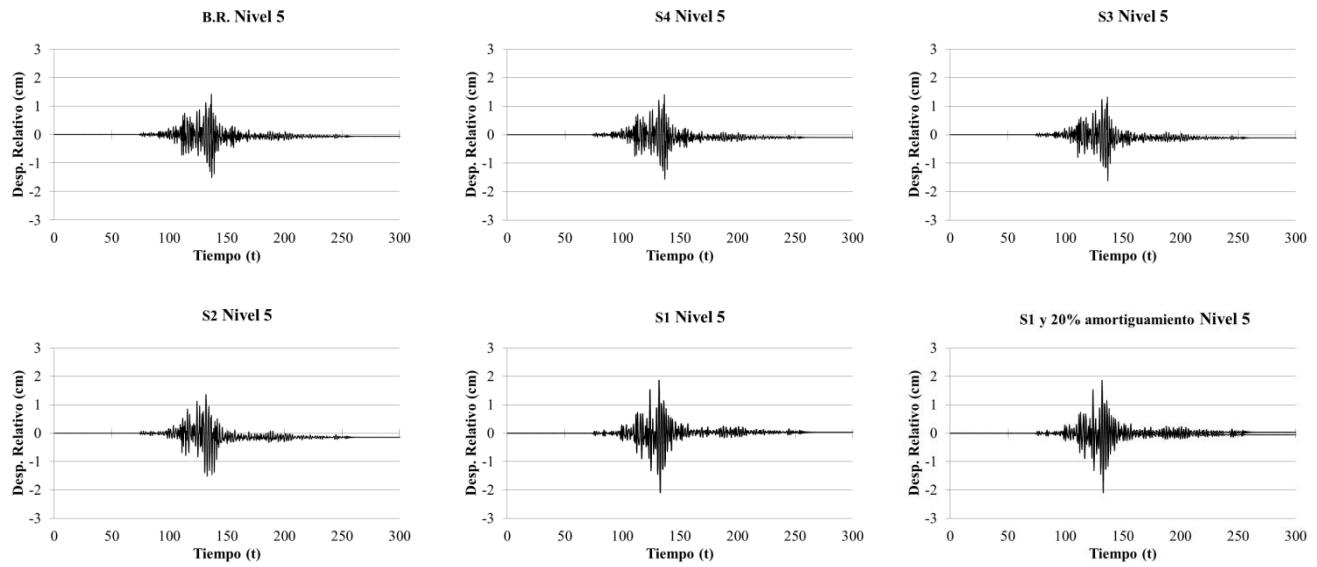
**Figura 42** Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (SCT-85).

En las Figuras 43 a 45 se muestran los desplazamientos relativos (sin movimientos de cuerpo rígido debidos a la IDSE), del primer, quinto y último nivel de los modelos reforzados, para los distintos suelos de estudio.

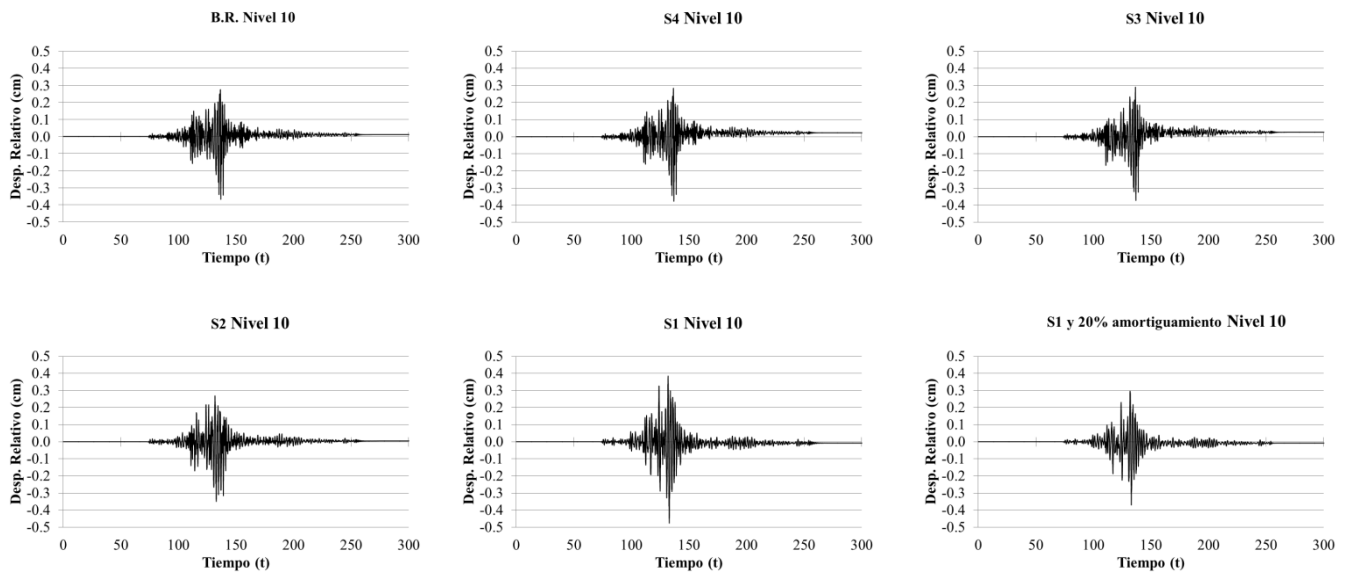
Se observa que para las distintas condiciones de apoyo, los desplazamientos relativos no ven muy afectados por la flexibilidad del sistema suelo cimentación, incluso los desplazamientos de entrepiso del modelo MCR-S1 son ligeramente mayores a los desplazamientos de base fija.



**Figura 43** Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (SCT-85).



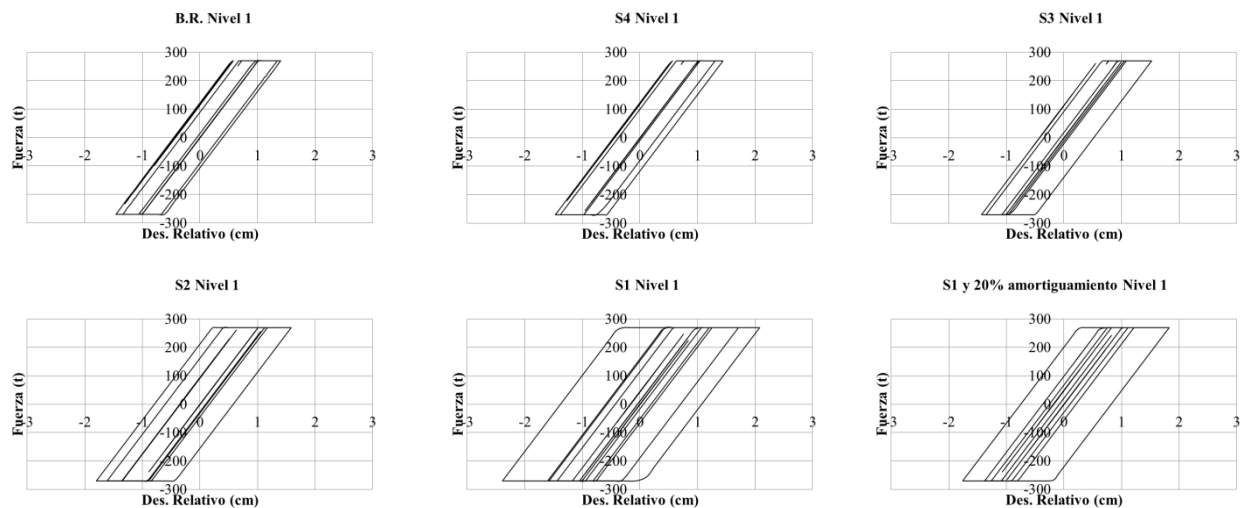
*Figura 44 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (SCT-85).*



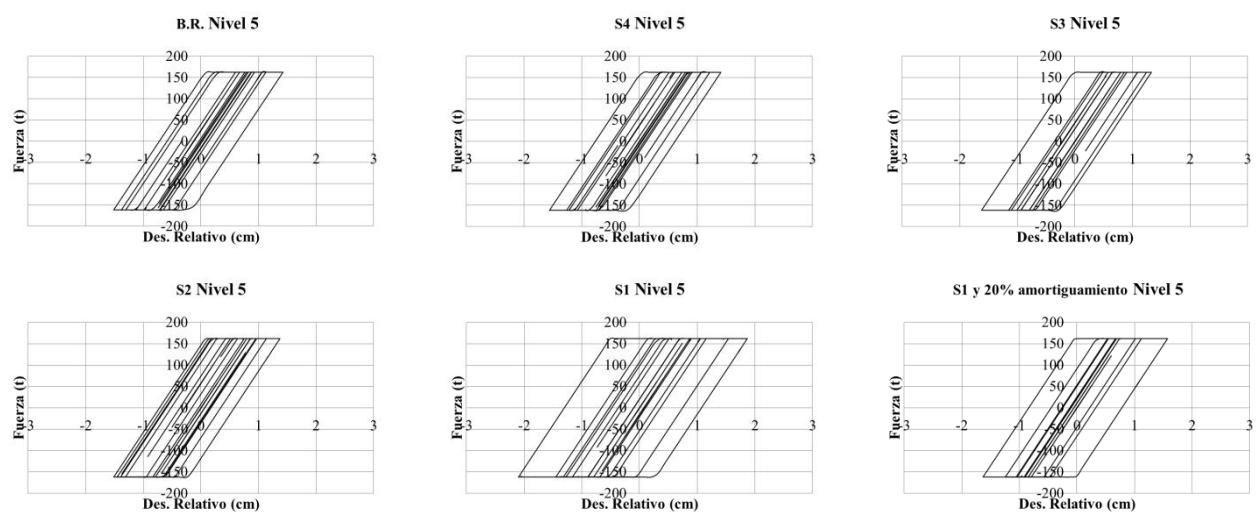
*Figura 45 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (SCT-85).*

Se graficaron las curvas de histéresis de los disipadores de energía, donde se observa que los disipadores trabajaron más en la condición del suelo más blando, incluso para el modelo donde el amortiguamiento se aumentó a un 20% (Figura 46 a Figura 48).

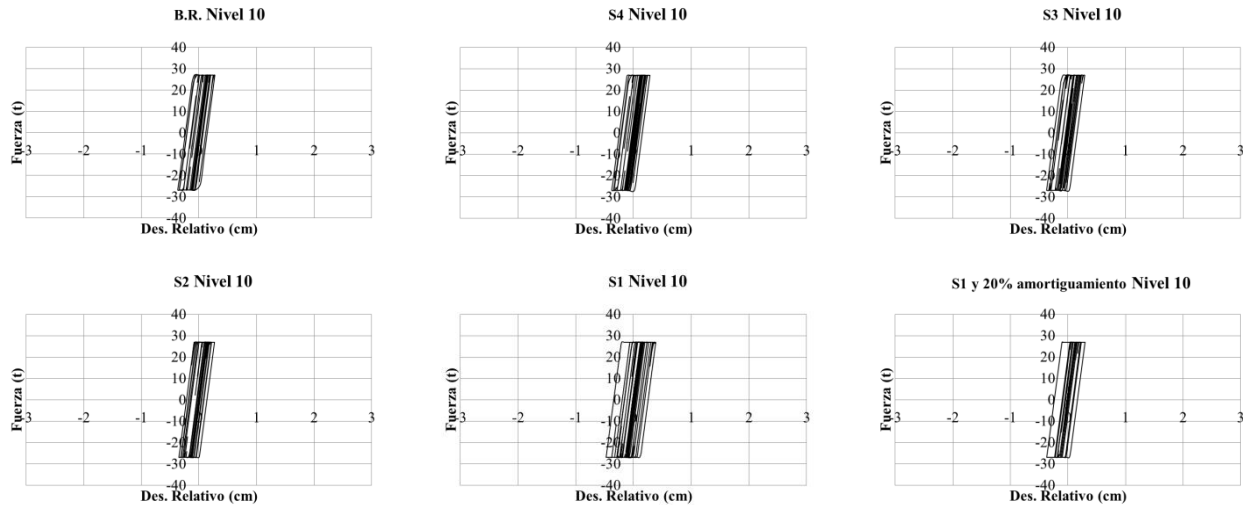
Algo curioso a notar es que en base rígida el disipador del quinto nivel disipa mucho más energía que el del primer nivel, ya que en los pisos intermedios se concentra grandes deformaciones de entrepiso. Si se considera la IDSE para los casos de S2 y S1 se observa que el disipador del primer nivel disipa la misma o ligeramente mayor energía que el disipador del quinto nivel.



**Figura 46 Ciclos histéricos del disipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85).**

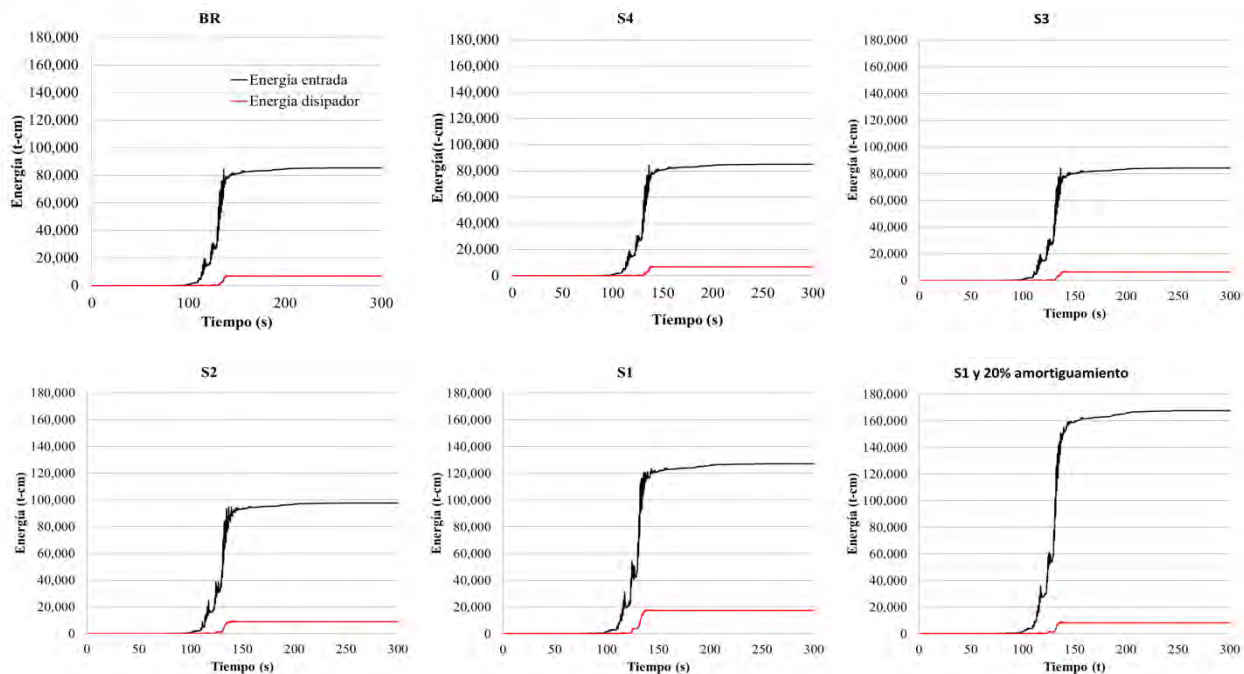


**Figura 47 Ciclos histéricos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85).**

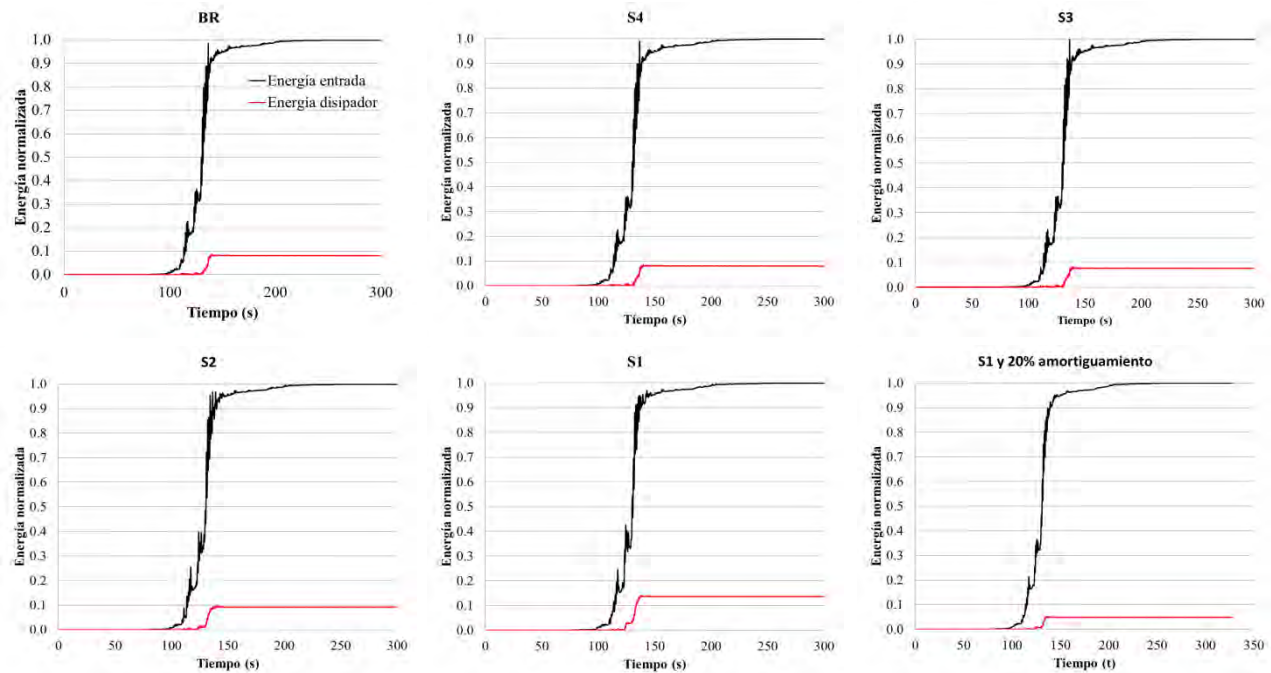


**Figura 48 Ciclos histeréticos del dissipador del último nivel para las distintas condiciones de apoyo (SCT-85).**

En la Figura 49 se muestra la energía absoluta que el registro SCT-85 escalado le induce al modelo, así como la energía que el sistema de disipación absorbe. Además se muestra en la Figura 50 la energía normalizada. Se nota que los dissipadores sobre base fija absorben alrededor del 10% de la energía de entrada. Los dissipadores de los modelos MCR-S4, S3 y S2 también absorben el 10% de energía de entrada. El sistema de disipación del modelo MCR-S1 absorbe el 15 % de la energía de entrada. Para el caso con un 20% de amortiguamiento extra, los dissipadores absorben solamente un 5% de la energía de entrada.



**Figura 49 Energía de entrada del sismo y energía que absorben los dissipadores del marco (SCT-85).**



**Figura 50 Porcentaje energía que absorben los disipadores del marco (SCT-85).**

Se puede notar entonces que el porcentaje de energía que absorben los disipadores, depende en cierta magnitud de la condición de flexibilidad del suelo, y que ésta puede aumentar o disminuir la eficiencia de los dispositivos.

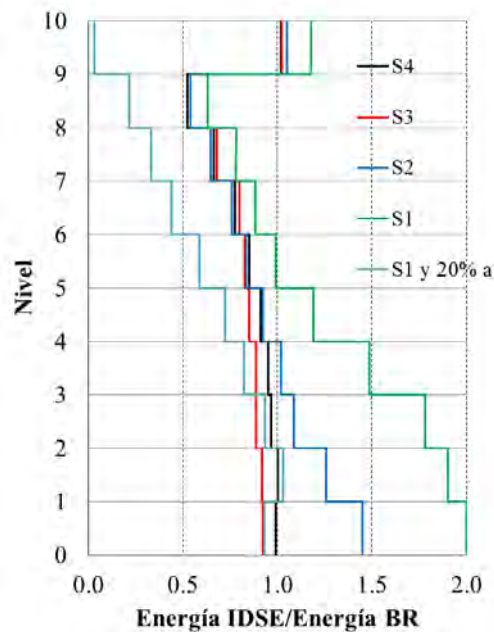
Se calculó un perfil de disipación de energía por entrepiso, donde se puede observar claramente cómo trabaja cada disipador respecto a los de base rígida (Figura 51). En esta figura los valores mayores a uno, significan que los dispositivos con IDSE de ese nivel disipan más energía que en base rígida, por otra parte si el valor es menor a uno el dispositivo con IDSE disipa menos energía que en base rígida.

Las cosas a notar es como la IDSE en los modelos MCR-S1 y MCR-S2, tiende a que los disipadores de pisos inferiores (primer al quinto nivel) disipen más energía que en base rígida, esto tiene un gran impacto en el diseño de estos dispositivos, ya que como se muestra, los disipadores pueden llegar a absorber hasta el doble de energía de entrada. En este caso se puede decir que existe un aumento en la eficiencia de los dispositivos disipadores de energía de los pisos inferiores debido a la IDSE, pero en un diseño formal se tiene que revisar si el dispositivo fue diseñado para absorber el doble de energía de entrada.

También se muestra como la IDSE para los disipadores de los niveles superiores (quinto al noveno), hace que tiendan a disipar menos energía de entrada mientras más flexible es el suelo. En otras palabras existe una reducción de la eficiencia del sistema de disipación en estos niveles, debido a la IDSE.

El sistema de disipación de energía del caso de estudio adicional (MCR-S120a), tiende a disipar en todos los entrepisos, una menor cantidad de energía de entrada que para el caso de base fija. Aquí se observa cómo influye el aumento del amortiguamiento, debido a la IDSE en la eficiencia del dispositivo disipador de energía.

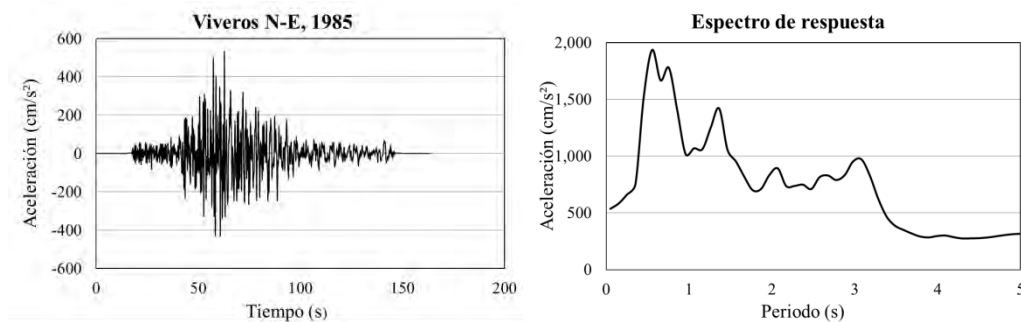
Se puede observar en la Figura 50 que en los casos aquí estudiados los disipadores absorben poca energía de entrada, esto se puede deber a un mal diseño de los dispositivos del modelo y del sismo aquí estudiado, en un diseño formal la energía restante se tendría que absorber por algún otro mecanismo de disipación de energía de la estructura.



*Figura 51 Perfil de disipación de energía por entrepiso (SCT-85).*

#### 4.4 Marco sujeto al registro de Viveros N-E, 1985.

El segundo registro corresponde a la estación Viveros del sismo del 19 de septiembre de 1985, cuyos, registro escalado y espectro de respuesta se muestran en la Figura 52.



*Figura 52 Registro y Espectro escalado de la estación Viveros-85*



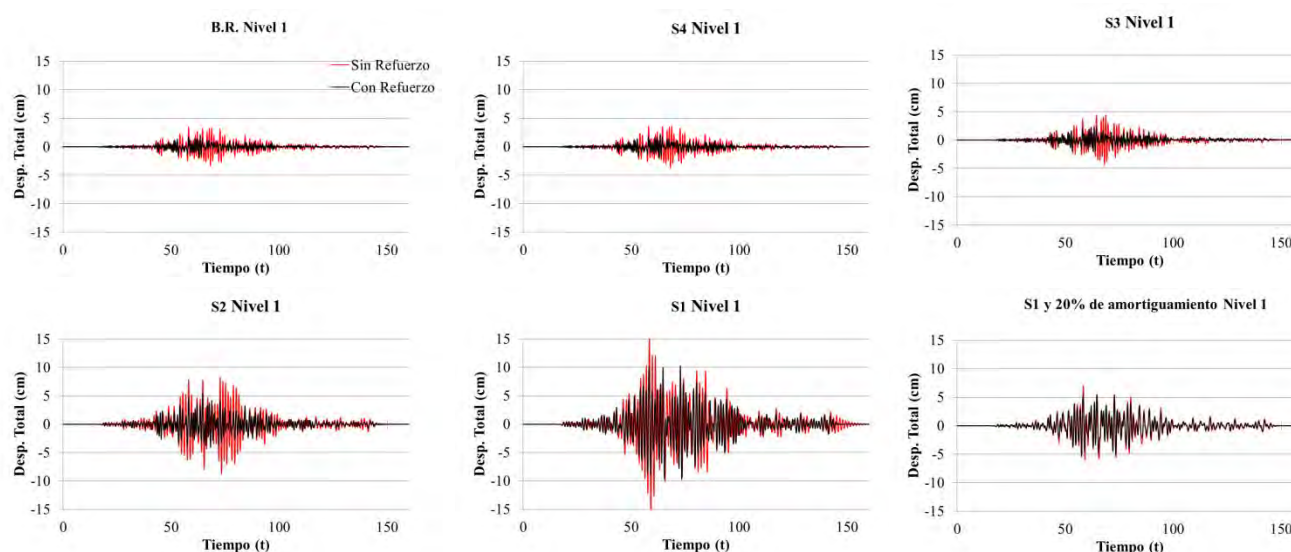
Para este registro se realizaron los mismos análisis que con el sismo SCT-85 y se obtuvieron resultados similares. Por un lado, en las Figura 53 a Figura 55, para mostrar la efectividad del sistema de refuerzo, se presentan los desplazamientos totales del entrepiso 1, 5 y 10 de los modelos sin refuerzo y reforzados para las distintas condiciones de apoyo.

Se puede notar una menor efectividad del sistema de refuerzo para los apoyos más flexibles, en cuanto a la reducción de los desplazamientos totales.

También, se calculó el porcentaje de reducción promedio de los desplazamientos, así como el porcentaje de reducción del desplazamiento máximo, donde se observa en general una menor eficiencia del sistema de disipación si se considera la IDSE (Tabla XI).

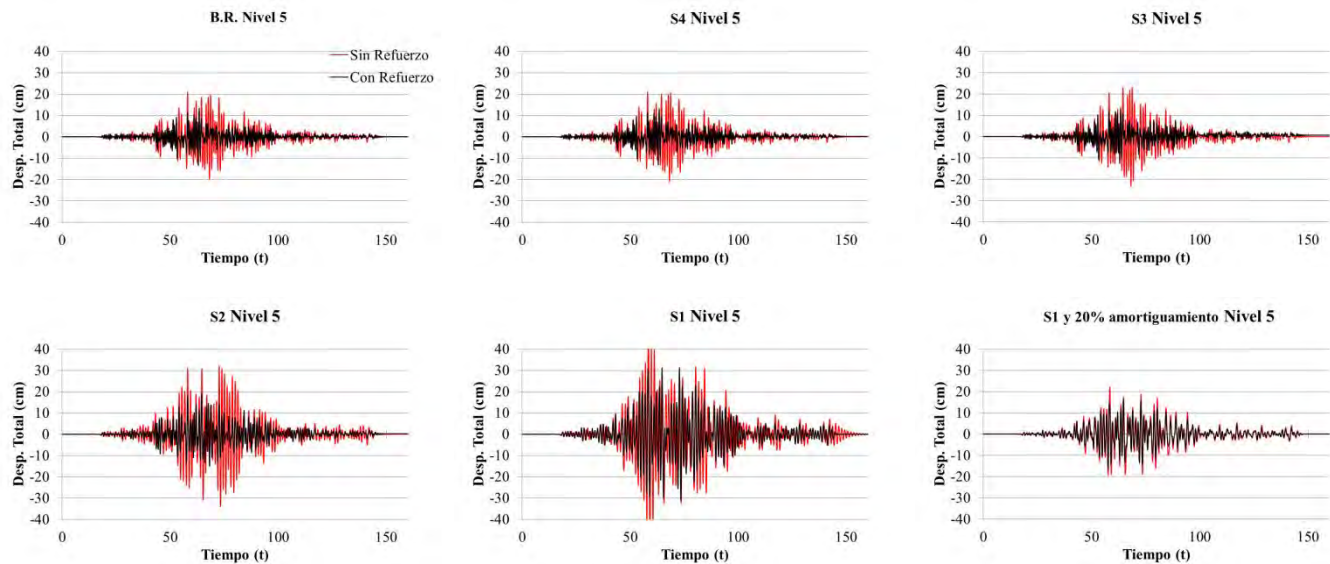
**Tabla XI Porcentaje de reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (Viveros).**

	NIVEL 1		NIVEL 5		NIVEL 10	
Apoyo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
BR	53	40	50	37	45	33
S4	51	40	50	37	45	33
S3	49	47	48	40	45	35
S2	46	34	49	40	47	35
S1	24	33	30	38	28	36
S1 y $20\zeta_{eq}$	10	10	21	15	19	14

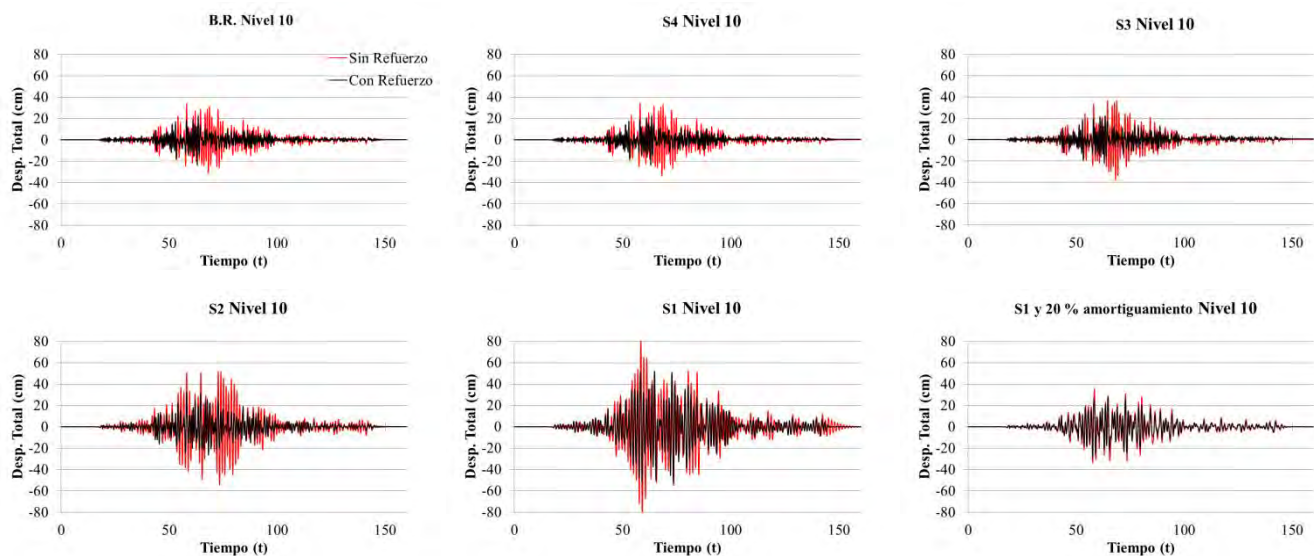


**Figura 53 Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).**





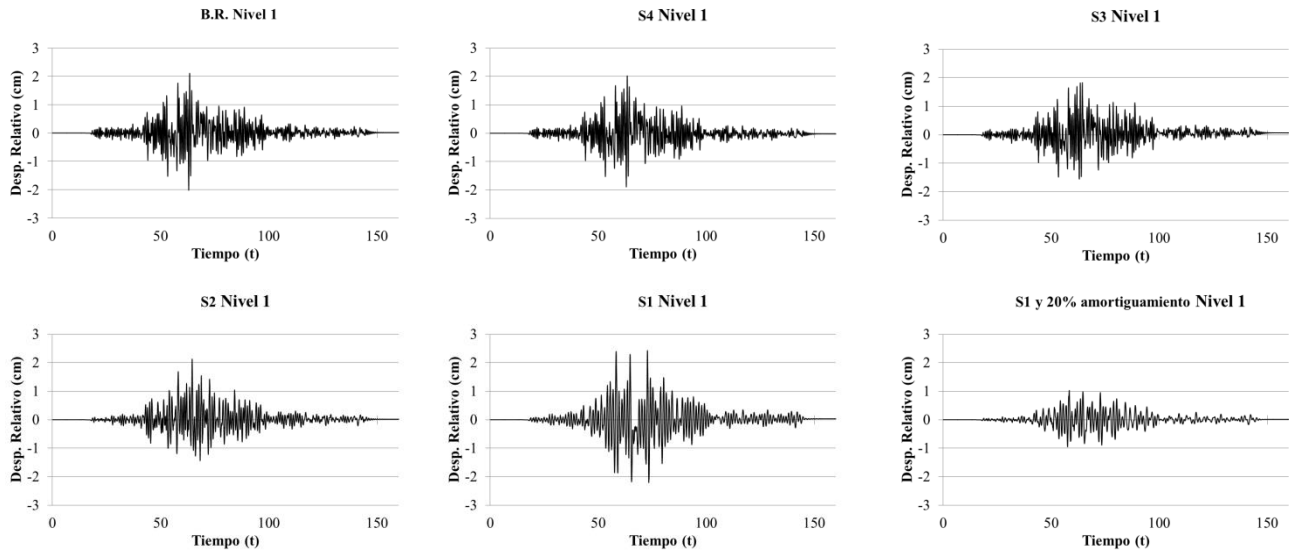
*Figura 54 Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).*



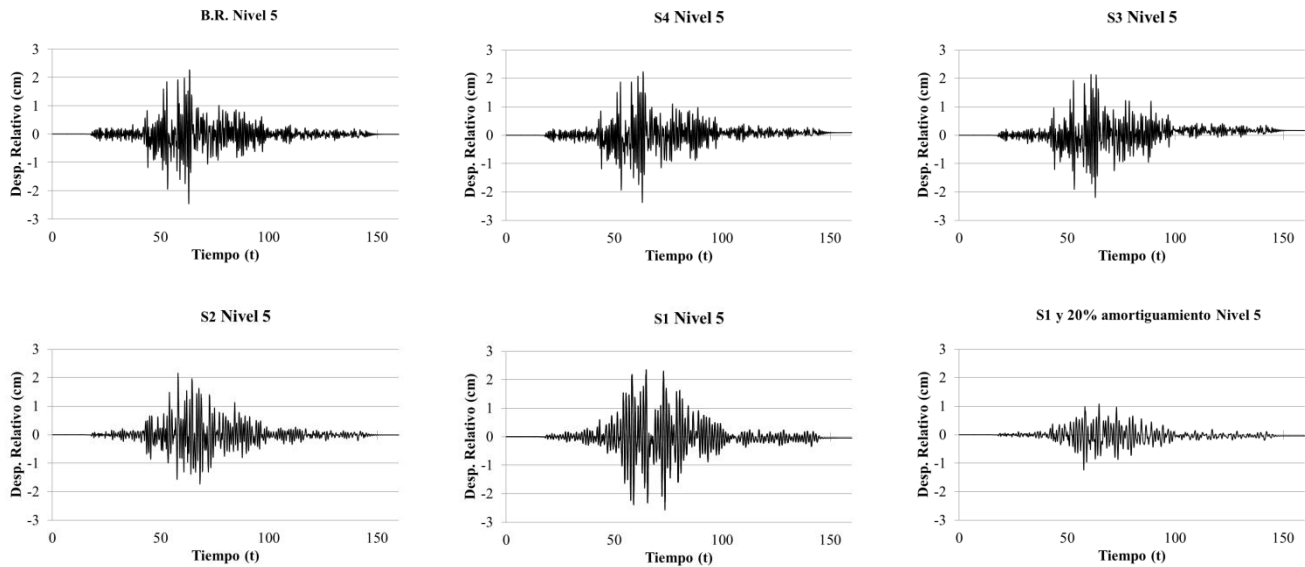
*Figura 55 Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Viveros-85).*

En las Figuras 56 a 58 se muestran los desplazamientos relativos de entrepiso de los marcos reforzados, sometidos a Viveros-85, donde se observa cómo los desplazamientos relativos de entrepiso disminuyen ligeramente para los modelos MCR-S4 MCR-S3 y MCR-S2, aumentan

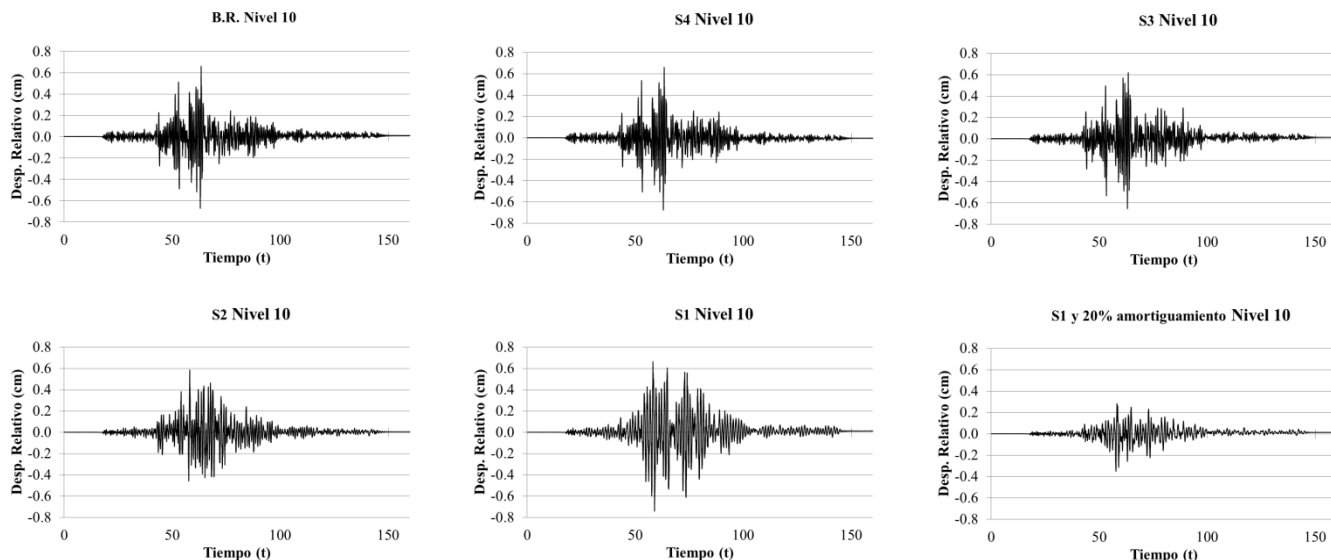
para el modelo MCR-S1 y finalmente disminuyen sustancialmente para el modelo MCR-S120a. Este cambio en aumento o disminución del desplazamiento relativo se puede asociar a la IDSE y al nivel de aceleración que se sujetan los distintos modelos.



*Figura 56 Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (Vivero-85).*

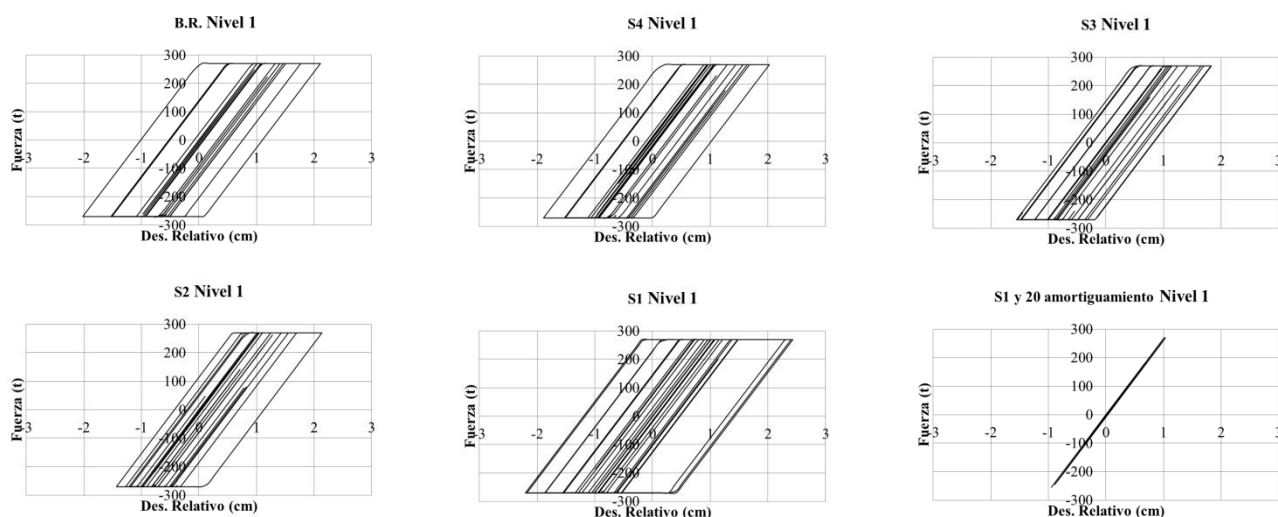


*Figura 57 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (Vivero-85).*

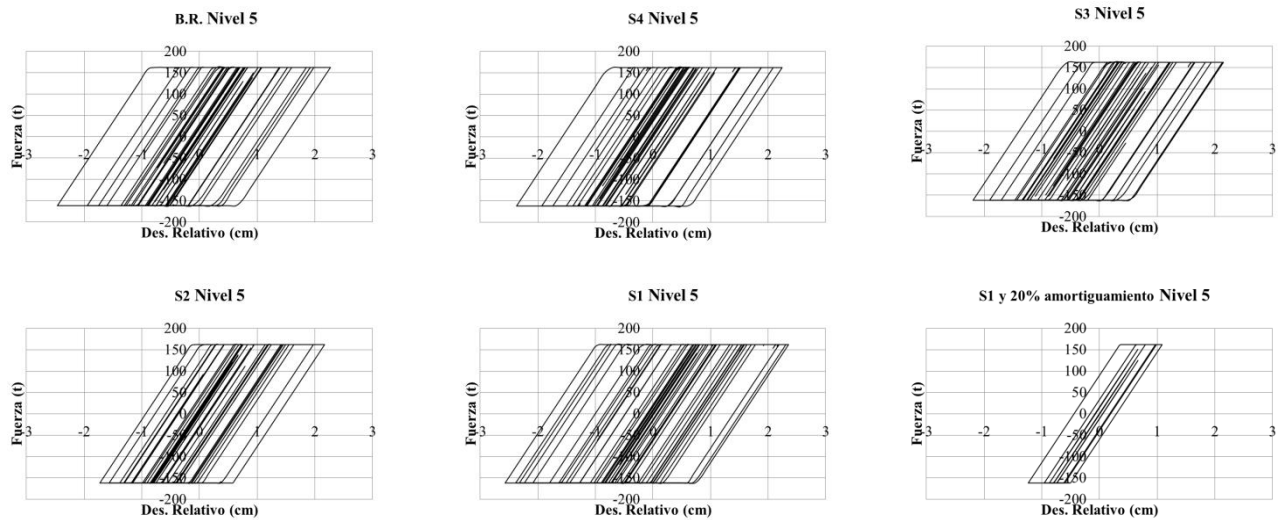


**Figura 58 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (Vivero-85).**

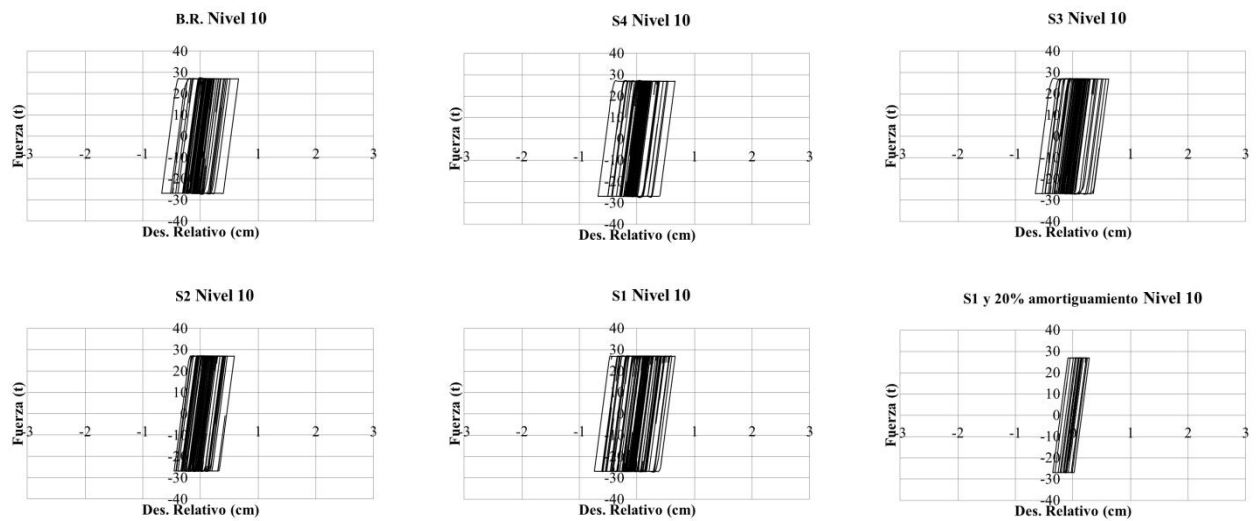
En las Figuras 59 a 61 se muestran los diagramas de histéresis de los disipadores de energía. Se nota que existe un menor trabajo del disipador de energía para los modelos MCR-S4, MCR-S3 y MCR-S2 comparados con los de base rígida, aparentemente en el modelo MCR-S1 el disipador trabaja más que en base fija, esto para los niveles aquí mostrados. También se puede observar que el considerar un amortiguamiento extra del 20%, reduce en gran proporción los ciclos histéricos del disipador, incluso el disipador del primer nivel no alcanza a fluir, mientras que el del quinto nivel apenas fluye.



**Figura 59 Ciclos histéricos del disipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85).**



**Figura 60 Ciclos histeréticos del dissipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85).**



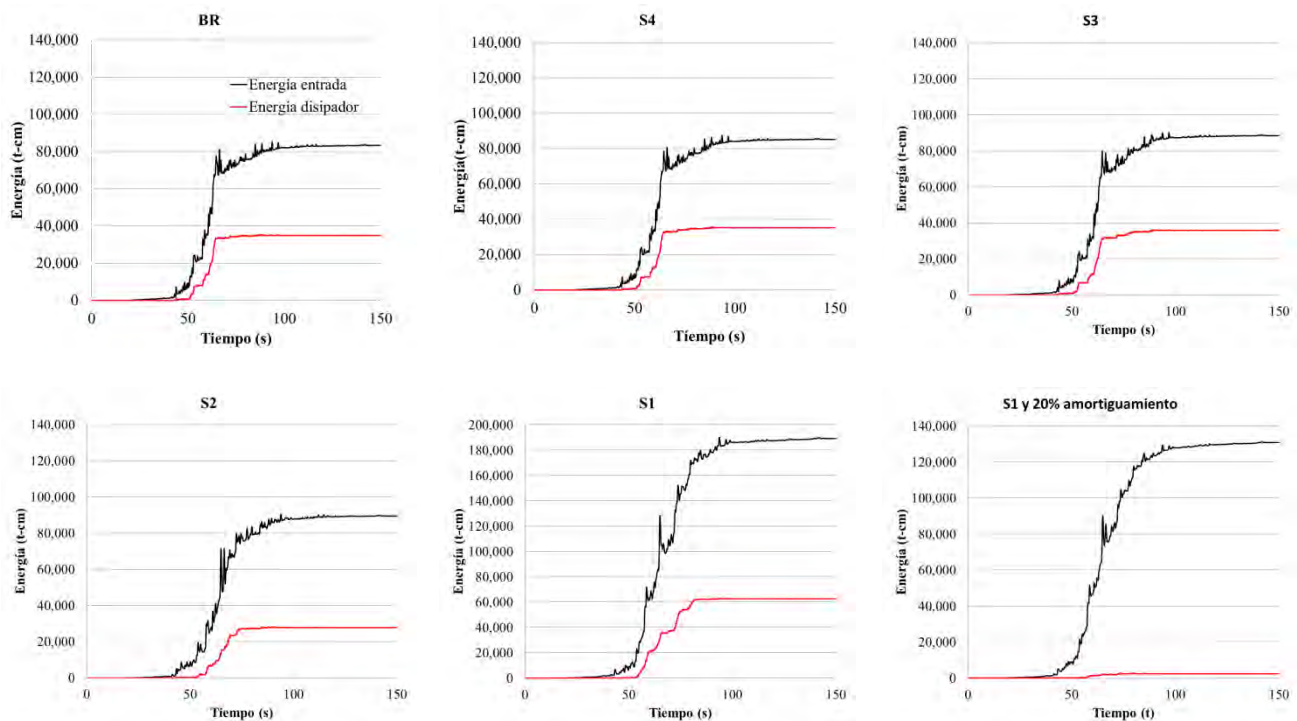
**Figura 61 Ciclos histeréticos del dissipador del último nivel para las distintas condiciones de apoyo (Viveros-85).**

Además, en las Figuras 62 y 63 se muestra la efectividad de los dissipadores en términos de la energía de entrada y la energía que absorben los dispositivos. En estas figuras se nota que los dispositivos sobre base rígida absorben el 40% de la energía de entrada, y va disminuyendo hasta los modelos MCR-S2 y MCR-S1, donde los dissipadores solo absorben el 30% de la energía. Para el modelo MCR-S120a la energía que disipa el grupo de

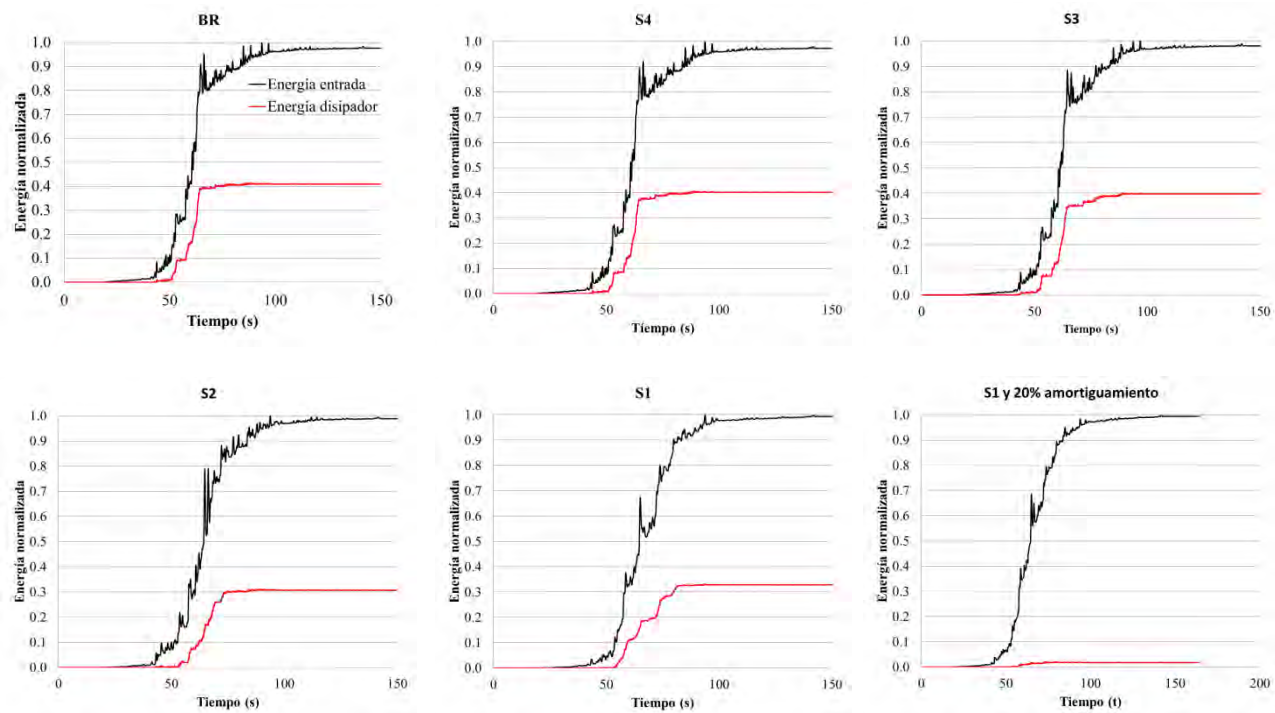
disipadores es casi nula, en este caso se observa que esa energía de alguna manera tiene que ser absorbida por algún otro mecanismo, lo que lleva a que en este caso los disipadores no son tan efectivos como en base rígida.

Lo curioso a notar es que a pesar que los diagramas de histéresis del modelo MCR-S1 muestran mayor trabajo que los de base rígida, en términos del porcentaje de energía de entrada disipada muestran una menor eficiencia; esto se debe a que la energía de entrada para el modelo con IDSE es mucho mayor que la energía de entrada en base rígida.

El caso adicional muestra más notoriamente que los disipadores son menos efectivos, si se considera un aumento en el amortiguamiento debido a la flexibilidad del sistema suelo cimentación.



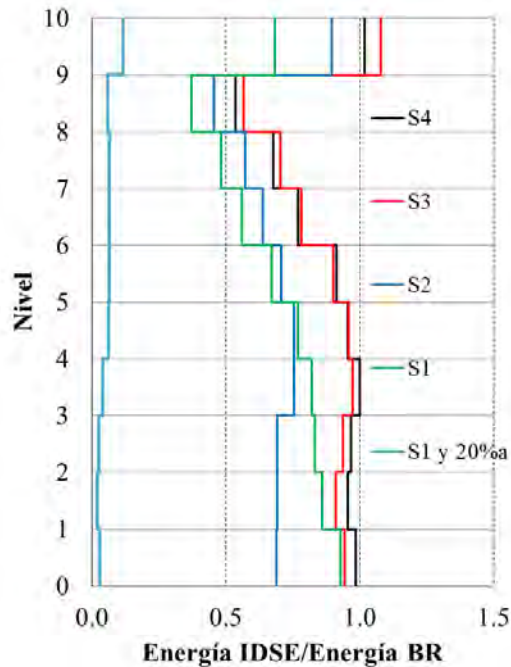
**Figura 62** Energía de entrada del registro de Viveros-85 y energía que absorben los disipadores del marco.



**Figura 63 Porcentaje energía que absorben los disipadores del marco (Viveros-85).**

En la Figura 64 se presenta el perfil del porcentaje de energía que se disipa por entrepiso para cada suelo de estudio, normalizada al porcentaje de energía disipada en base rígida. Se observa en este caso como la IDSE para los modelos MCR-S3 y MCR-S4, en los pisos inferiores (primero al quinto) no influye mucho, ya que el porcentaje de energía que se disipa es muy similar al de base rígida. Es curioso ver como para los niveles superiores (sexto al noveno), la IDSE disminuye la eficiencia de estos dispositivos. También se observa como la IDSE para los modelos MCR-S2 y MCR-S1 disminuye en general la efectividad de todo el sistema de disipación de energía, ya que en todos los entrepisos los dispositivos disipan menos porcentaje de energía de entrada que los dispositivos de base rígida. Además el caso adicional (MCR-S120a) muestra claramente una menor efectividad de los disipadores de entrepiso si se considera la IDSE.

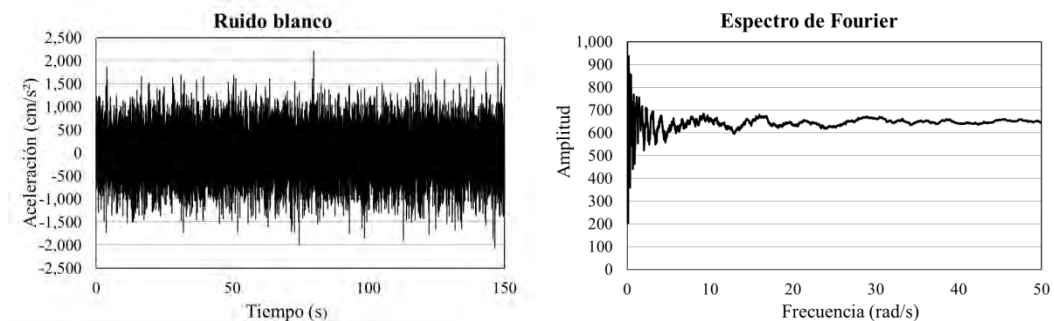
En este caso se muestra en la Figura 63 que la energía que absorben los disipadores es gran parte de la energía de entrada, por lo que se podría pensar que el diseño de los disipadores es adecuado para esta estructura sujeta a las características de sismo aquí estudiadas.



*Figura 64 Perfil de disipación de energía por entrepiso (Viveros-85).*

## 4.5 Marco sujeto a ruido blanco.

Una variable que no se puede controlar con los registros de un sismo es que, con la variación del periodo, existen cambios en la aceleración a la que se sujeta la estructura, por ello se decidió hacer un análisis con ruido blanco para que el nivel de aceleración al que están sometidos los modelos con y sin refuerzo e IDSE fuera casi el mismo y este no influyera en los resultados, el ruido y su espectro se muestran en la Figura 65.



*Figura 65 Ruido blanco y espectro de Fourier.*

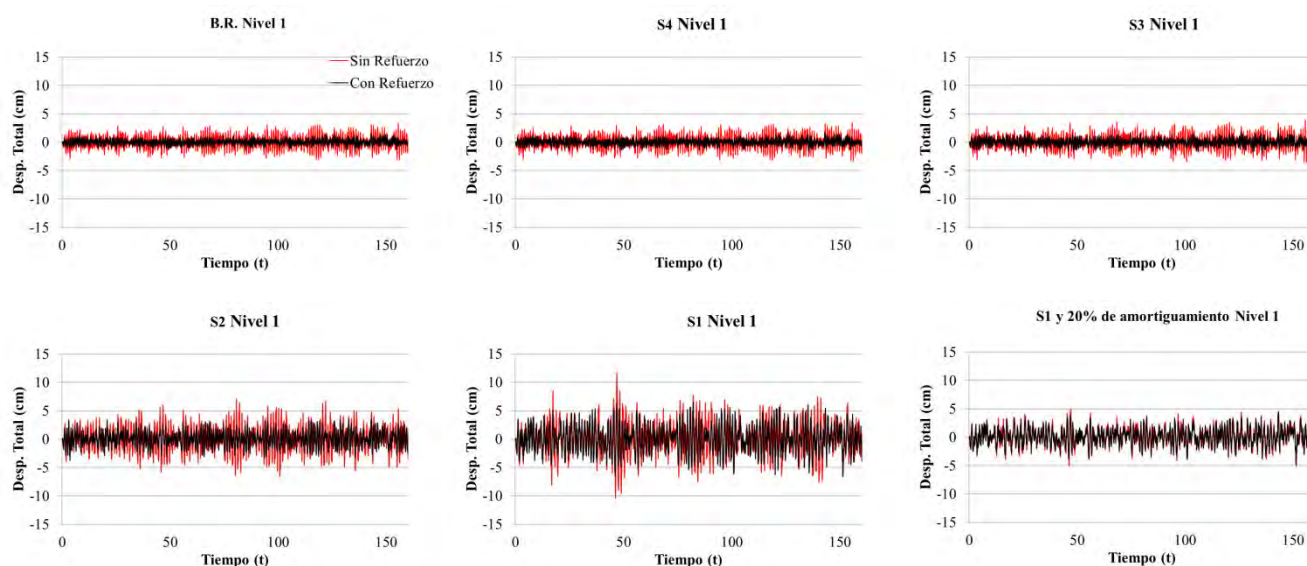


Se presentan resultados similares a los análisis con registros de sismos, excepto la respuesta en términos de la energía.

En la Tabla XII se puede observar que incluso para niveles de aceleración similar, el refuerzo contraviento-disipador es menos efectivo si se considera la IDSE. En este caso esta menor eficiencia, se debe mayoritariamente a la flexibilidad del sistema suelo cimentación y no es un cambio asociado al nivel de aceleración que se somete la estructura.

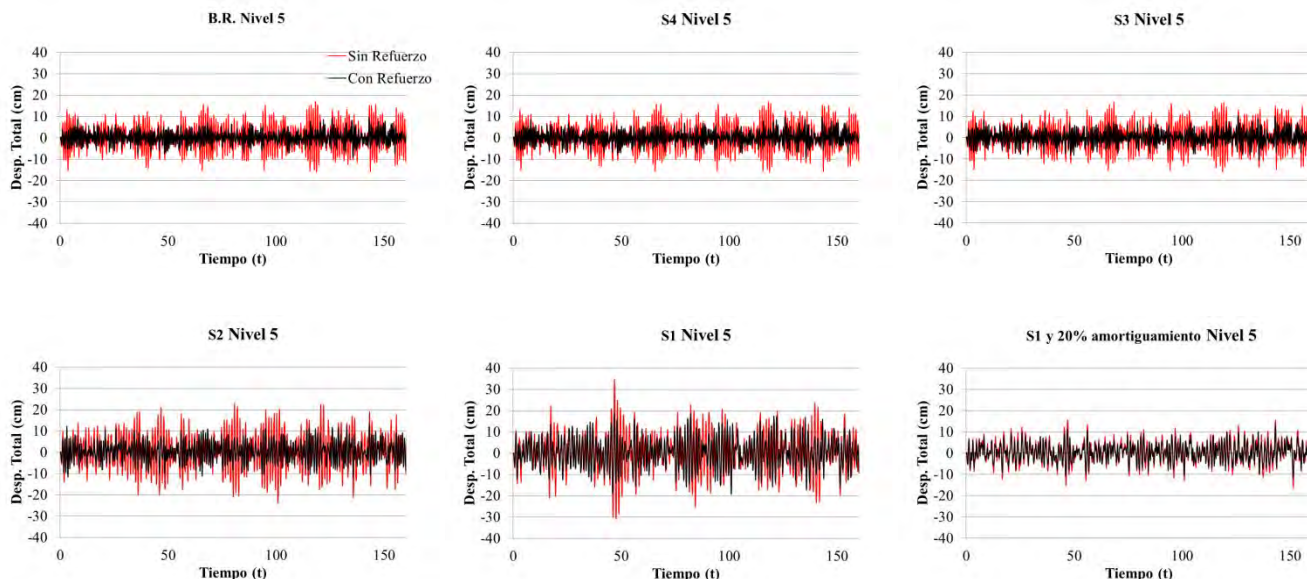
**Tabla XII Porcentaje reducción de la respuesta para las distintas condiciones de apoyo nivel 1, 5 y 10 (Ruido blanco).**

	NIVEL 1		NIVEL 5		NIVEL 10	
Apoyo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
BR	56	52	50	43	45	38
S4	53	50	49	40	44	36
S3	49	45	46	35	41	38
S2	38	43	44	40	39	36
S1	17	37	25	37	21	36
S1 y $20\zeta_{eq}$	10	6	20	18	17	19

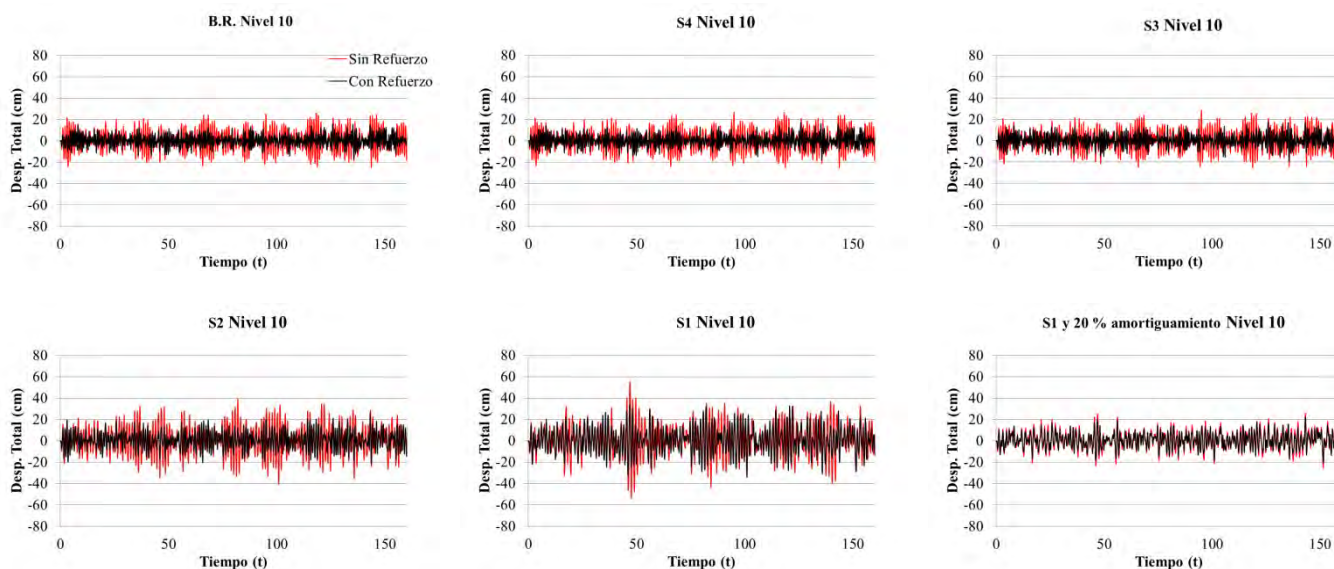


**Figura 66 Desplazamiento total del primer nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).**



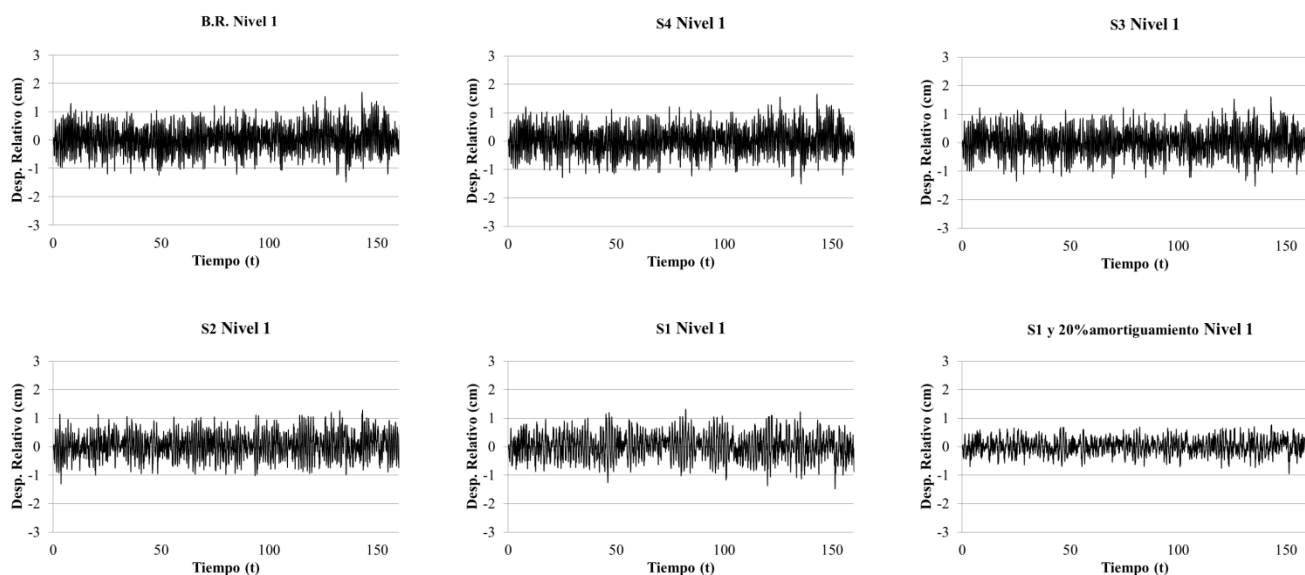


**Figura 67** Desplazamiento total del quinto nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).

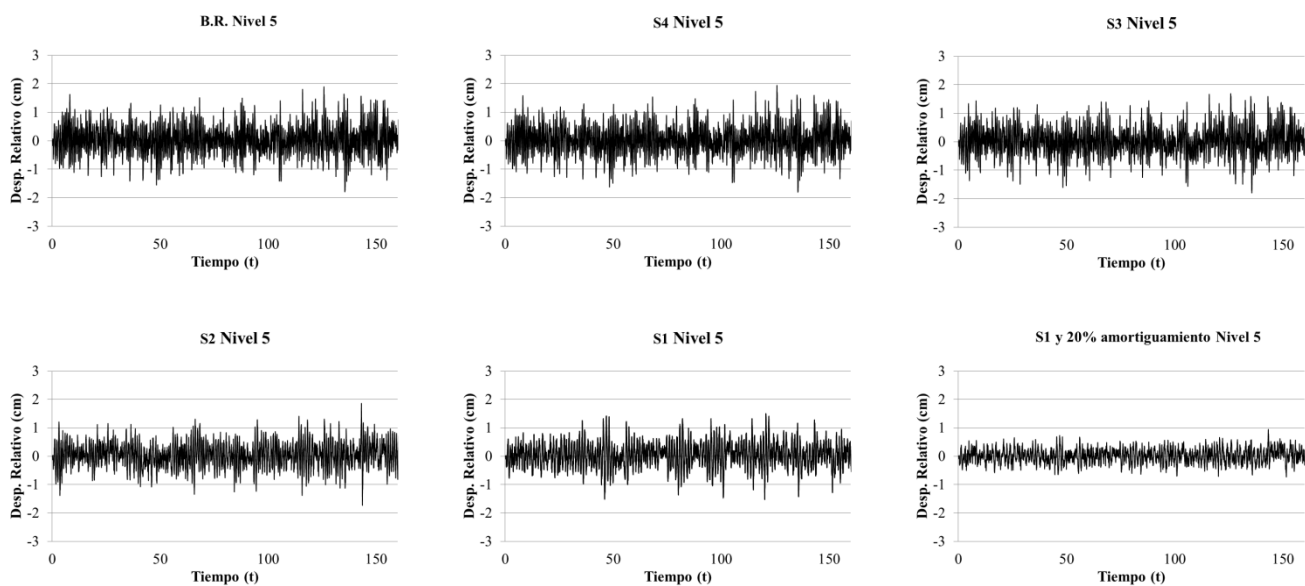


**Figura 68** Desplazamiento total del último nivel para modelos con y sin refuerzo, para los distintos suelos (Ruido blanco).

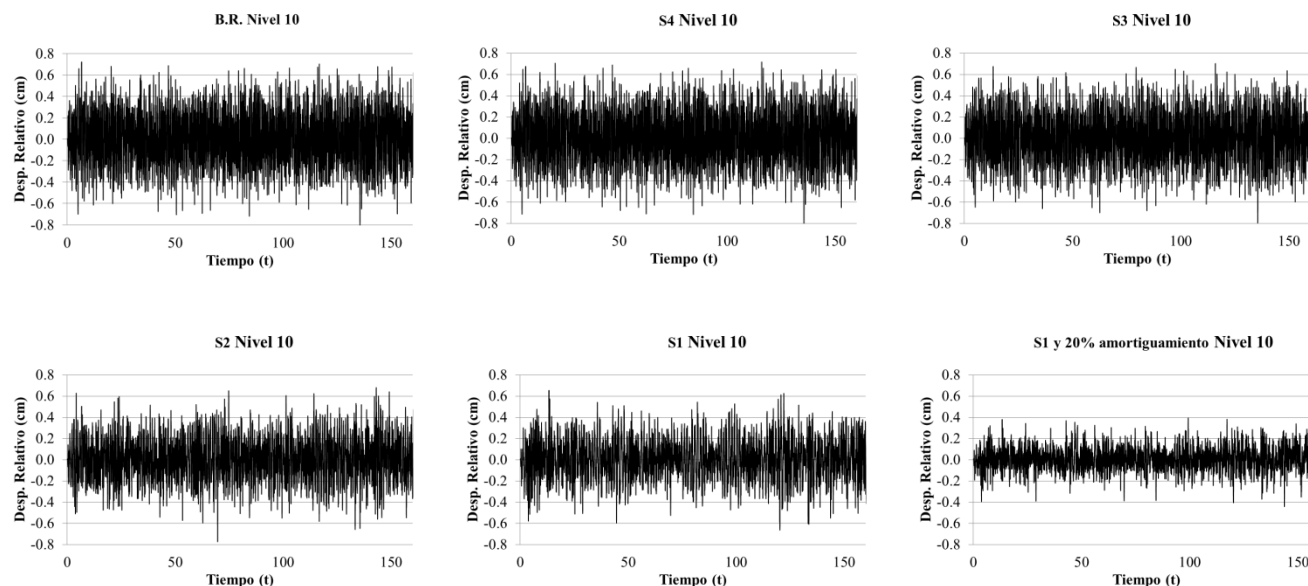
Se muestran en la Figuras 69 a 71 los desplazamientos relativos de entrepiso, para los modelos sometidos a un ruido blanco. Se observa que aunque todos los modelos están sometidos a un nivel similar de aceleración, existe una disminución de los desplazamientos relativos debido a la IDSE para suelos más blandos. El caso más evidente es para el modelo MCR-S120a, donde los desplazamientos relativos de entrepiso son más pequeños comparados con los de base rígida



*Figura 69 Desplazamientos relativos del primer nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco)*



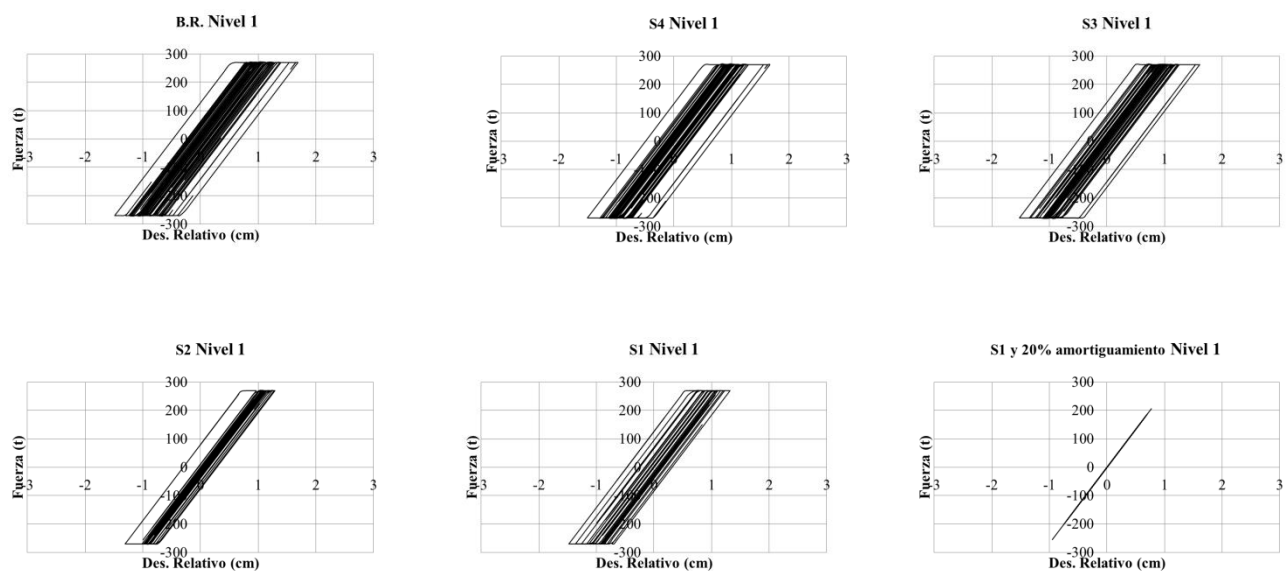
*Figura 70 Desplazamientos relativos del quinto nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco)*



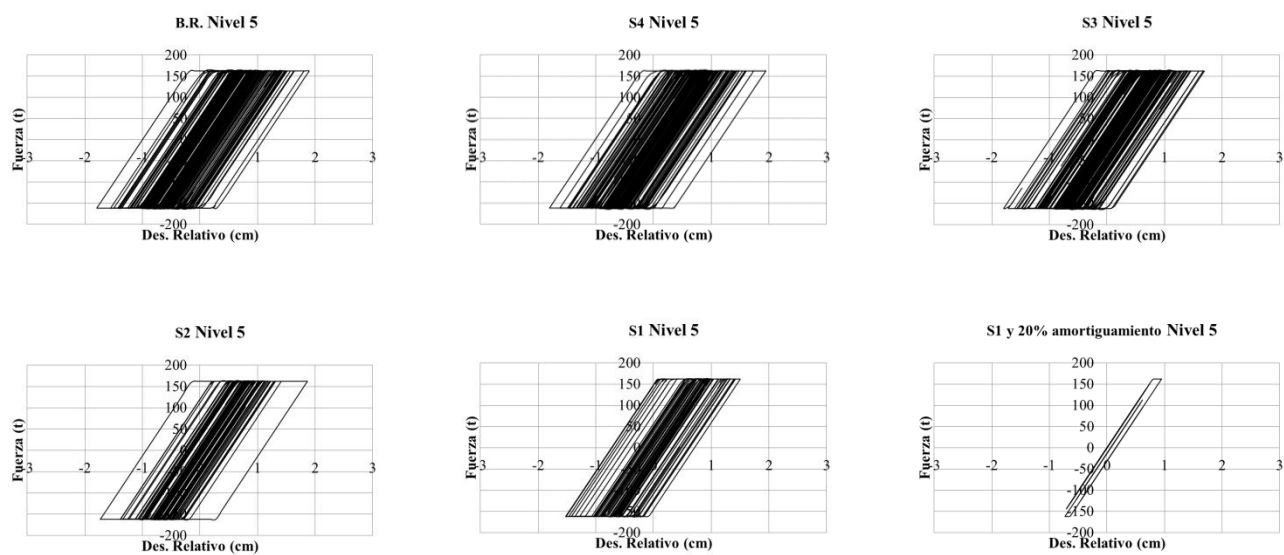
*Figura 71 Desplazamientos relativos del último nivel de los modelos reforzados (Ruido blanco)*

En las Figuras 72 a 74 se muestran los ciclos de histéresis de los disipadores de energía sometidos a un ruido blanco. Los diagramas de histéresis muestran una menor disipación de energía para los modelos donde se considera la IDSE, por ejemplo, los modelos MCR-S2 y MCR-S1 muestran para estos entresijos, que los lazos de histéresis son más chicos que los de base rígida. En otras palabras, ante un similar nivel de aceleración la IDSE puede reducir en este caso la efectividad de los disipadores.

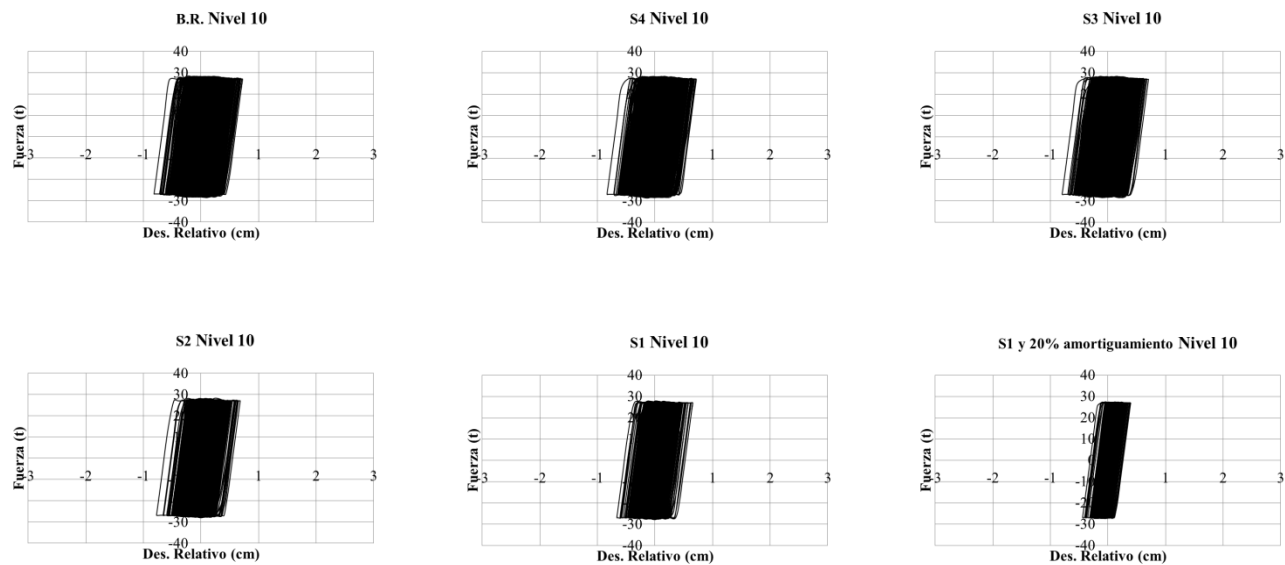
Otro caso muy evidente del impacto de la IDSE en la eficiencia del sistema de disipación es el del modelo MCR-S120a, donde se observa una disminución radical en la eficiencia del disipador, ya que se observa, por ejemplo, que el disipador del primer nivel no fluyen y el disipador del quinto nivel apenas empieza a fluir. Se puede decir entonces de los casos aquí mostrados que la IDSE para suelos más blandos, puede disminuir la efectividad de los disipadores de energía ante un similar nivel de aceleración.



**Figura 72 Ciclos histeréticos del dissipador del primer nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).**



**Figura 73 Ciclos histeréticos del dissipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).**



*Figura 74 Ciclos histeréticos del disipador del quinto nivel para las distintas condiciones de apoyo (Ruido blanco).*

# Conclusiones y recomendaciones.

En el presente trabajo se desarrollaron análisis paso a paso de marcos con disipadores de energía histeréticos, considerando la interacción dinámica suelo estructura (IDSE), con la finalidad de obtener la eficiencia de los disipadores de energía, si se toma en cuenta la flexibilidad del sistema suelo cimentación.

Se usaron cuatro suelos distintos, con velocidades de propagación de onda de cortante de  $V_s=400, 250, 100$  y  $69 \text{ m/s}$  (S4, S3, S2 y S1) y un caso adicional, el cual toma las características del suelo tipo S1 pero considera un 20% de amortiguamiento equivalente en la estructura (S120a). Además, se usaron dos registros de sismos con el objetivo de ver el comportamiento del marco ante registros de suelo blando y suelo de transición (SCT E-W, 1985 y Viveros N-E, 1985), además se utilizó un ruido blanco, con la finalidad de que el nivel de aceleración al que se someten los modelos no influyera en los resultados.

Los análisis se desarrollaron usando el programa OpenSees (Mazzoni, 2006), y se muestra que en él se puede modelar satisfactoriamente el comportamiento no lineal del disipador y la flexibilidad del sistema suelo cimentación.

De los análisis y modelos aquí estudiados se derivaron las siguientes conclusiones:

- Para la cimentación y suelos estudiados se obtuvo que éstos no afectan en demasía una de las propiedades dinámicas de la estructura como lo es el amortiguamiento.
- Para el sistema de refuerzo (contraviento-disipador). En general se observa que mientras más flexible sea la condición de apoyo, el porcentaje de reducción del desplazamiento promedio y máximo es menor. Es decir el refuerzo contraviento disipador es menos efectivo si se considera la IDSE, para los modelos y registros aquí estudiados.

Para los modelos excitados con SCT E-W-85

- Las curvas de histéresis de los disipadores de energía, muestran que los dispositivos de los modelos con IDSE trabajaron más que en base rígida.
- Se obtuvo que en base rígida el disipador del quinto nivel disipa más energía que el del primer nivel, ya que en estos pisos se ha observado que se concentra grandes deformaciones. Si se considera la IDSE se observa que el disipador del primer nivel disipa la misma o ligeramente mayor energía que el del quinto nivel.
- Se obtuvo que en términos del porcentaje de energía de entrada que absorbe el sistema de disipación en base rígida comparada con los modelos MCR-S4, MCR-S3 y MCR-S2, es muy similar ya que en estos casos se disipa alrededor del 10% de la energía de

entrada. Por otro lado para el modelo representativo de las arcillas de la ciudad de México (MCR-S1), el sistema de disipación absorbe el 15 % de la energía de entrada. Finalmente para el modelo MCR-S120a, los disipadores absorben solamente un 5% de la energía de entrada. De estos resultados se puede observar cómo la IDSE puede aumentar o disminuir la efectividad del sistema de disipación.

- En el perfil de disipación de energía por entrepiso, se observa como la IDSE modifica el porcentaje de energía que absorbe cada disipador de entrepiso, se nota que para modelos con suelos más flexibles (MCR-S1 y MCR-S2) los disipadores de los niveles inferiores (primero al quinto) disipan mucho más energía que en base rígida, y como para los pisos intermedios (sexto al noveno) los dispositivos con IDSE disipan menos porcentaje de energía de entrada que los dispositivos de base rígida.

Para los modelos sometidos a Viveros N-E-85

- Se observa como la IDSE disminuye los desplazamientos relativos de entrepiso en los modelos MCR-S4, MCR-S3 y MCR-S2, además se observa como el tamaño de los ciclos de histéresis de los dispositivos de estos modelos son más chicos, comparados con los de base rígida.
- En términos del porcentaje de energía de entrada que absorbe el sistema de disipación, se nota una menor efectividad para los modelos con suelos más blandos.
- El impacto que tiene el incremento del amortiguamiento, es que el sistema de disipación con IDSE es menos efectivo que en base rígida, ya que en algunos casos los disipadores no alcanzaron a fluir, o sí fluyeron, los lazos de histéresis son mucho más pequeños que en base rígida.
- En el perfil de disipación de energía por entrepiso se observa como la IDSE, influye en que los dispositivos absorban menos cantidad de energía que en base rígida. Además se observa como para un aumento del amortiguamiento el trabajo de disipación de energía de los dispositivos por entrepiso es muy poco respecto al de base rígida.

Para los modelos sometidos a un ruido blanco.

- Se observó como el sistema de refuerzo (contraviento-disipador) tiene una menor eficiencia si se considera la IDSE, en términos de la reducción del desplazamiento máximo y promedio del marco.
- Los desplazamientos relativos de entrepiso pueden disminuir respecto a los desplazamientos relativos en base rígida si se considera la IDSE.
- Los ciclos de histéresis de los disipadores sobre base rígida tienen una mayor área que los disipadores de los modelos MCR-S2 y MCRS1, es decir la efectividad de los disipadores puede disminuir si se considera la IDSE, ante un similar nivel de aceleración.

- En el modelo MCR-S120a se refleja que el aumento del amortiguamiento muestra una menor eficiencia del dispositivo sismorresistente, ya que el disipador del primer nivel no alcanzó los valores de fluencia, mientras que el disipador del quinto y último nivel muestran un trabajo de disipación mucho menor que en base fija.

En general los efectos que tienen la IDSE sobre el sistema de disipación radican en aumentar o disminuir la eficiencia del sistema de disipación. Por una parte se observó que la IDSE puede aumentar o no influir mucho en el porcentaje de disipación de energía para los primeros cinco entrepisos de los modelos aquí estudiados. Y por otra parte se demostró cómo la IDSE para los niveles superiores disminuye la efectividad de los disipadores de energía de estos entrepisos.

A partir de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

- Es necesario realizar un trabajo de investigación donde se considere un edificio completo, el cual tenga un diseño formal tanto del marco estructural como del sistema de disipación.
- En este trabajo se consideró que el sistema de refuerzo aporta el 50% de la rigidez de entrepiso, es necesario realizar un estudio donde se modifique este porcentaje, y obtener la efectividad del sistema de refuerzo considerando la IDSE.
- Se recomienda realizar un trabajo con otro sistema de suelo cimentación, los cuales modifiquen el amortiguamiento de la estructura, ya que se observó, en esta tesis que sí existe un aumento del amortiguamiento, el efecto de la IDSE sobre los dispositivos disipadores de energía es más evidente.

En base a los resultados aquí obtenidos se demuestra que la IDSE influye en la respuesta y la eficiencia de los disipadores de energía, aunque no es fácil establecer en qué condiciones, la IDSE reduce la efectividad de estos dispositivos, ya que estos efectos no solo dependen de las propiedades de la estructura, del suelo o de la cimentación, si no dependen de la excitación sísmica y sus características. Por ello se recomienda que la implementación de estos dispositivos se haga con cautela y sin dejar a un lado los efectos aquí presentados.



# Bibliografía

- [1] Aguirre M. y Sánchez R. (1992), "Structural seismic damper", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 5, pp. 1158-1171.
- [2] Avilés J. (2006), Notas de curso interacción suelo-estructura, México.
- [3] Avilés J. y Pérez-Rocha L. (2003), "Soil-Structure Interaction in yielding systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 17-33.
- [4] Avilés J. y Pérez-Rocha L. (2011), "Use of global ductility for design of structure-foundation systems", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 31, pp.1018-1026.
- [5] Carbonari S., Dezi S. y Leoni F. (2011), "Linear soil-structure interaction of coupled wall-frame structures on pile foundations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 31, pp.1296-1309.
- [6] Chopra, K. (1995), "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", Edit. Prentice-Hall, pp. 156-158.
- [7] Christopoulos C. y Filiatrault A. (2006), "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation", IUSS Press, University of Pavia, Italy, 2006.
- [8] EMRSA (2014), "Enrique Martinez Romero, S.A", [www.emrsa.com.mx](http://www.emrsa.com.mx)
- [9] Fernández L. y León I., (2008), "Diferencias de los mecanismos de colapso de edificios de acero sobre base rígida y base flexible", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Ver.
- [10] Flores. E., Cárdenas M. y Lomnitz C., (2009) "Respuesta sísmica en el lago de Texcoco. Resultados a partir de registros de movimientos fuertes", Revista de Ingeniería Sísmica, No 81, pp. 37-51.
- [11] Gazetas G (1983), "Analysis of machine foundation vibrations: state of the art", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, pp. 2-42.
- [12] Jennings P. y Bielak J. (1973), "Dynamics of building-soil interaction", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, pp. 9-48.
- [13] Mazzoni, S., Mc Kenna F., Scott M., y Fenves G (2006), "Open system for earthquake engineering simulation, user command-language manual". Report NEES grid-TR 2004-21. Pacific Earthquake Engineering Research, University of California, Berkeley. CA.
- [14] MDS-CFE (1993), "Manual de diseño de obras civiles: diseño por sismo", Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- [15] MOCS-CFE (2008), "Manual de diseño de obras civiles: diseño por sismo", Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- [16] Novak M, Sheta M, El-Hifnawy L, El-Marsafawi H. y Ramadan O. (2012), DYNA6.1: A computer program for calculation of foudation response to dynamic loads, Geotechnical Research Centre, The University of Western Ontario, Canada.

- [17] NTCS-2004 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.
- [18] Ruiz S. y Álvarez J. (1995), “Panorámica sobre la reglamentación de edificios con dispositivos reductores de la respuesta sísmica”, Memorias, IV Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica: Riesgo Sísmico y Reglamentación de Diseño, Oaxaca, pp.109-126.
- [19] SIRVE (2007), “Información Técnica, Disipación de Energía”, [www.sirve.cl](http://www.sirve.cl).
- [20] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (2001), “Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes”, México D.F.
- [21] Soong T. y Spencer Jr. B. (2002), “Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice”, Engineering Structures, No 24, pp. 243-259.
- [22] Stehmeyer E., y Rizos D. (2008), “Considering dynamic soil structure interaction (SSI) effects on seismic isolation retrofit efficiency and the importance of natural frequency ratio”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 28, pp.468-479.
- [23] Symans, M., Charney F., Whittaker A., Constantinou M., Kircher C., Johnson M., y McNamara R. (2008), “Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments,” Journal of Structural Engineering, ASCE, enero, pp.3-21.
- [24] Tena A. (2000), “Modelado analítico de edificios con disipadores de energía”, Revista de Ingeniería Sísmica, No 62, pp. 29-62.
- [25] Tena A. (2003), “Disipación pasiva de energía en México: Un estado del arte”, Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Barquisimeto, Venezuela, mayo.
- [26] Tena A. (2014), Notas del curso, Sistema de control de la respuesta sísmica, México.
- [27] Whittaker, A., Constantinou M. y Sigaher N. (1999) “Supplemental damping for new and retrofit construction”, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 61, pp 1-21.
- [28] Wolf, J (1985), Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, New Jersey.
- [29] Wu. J., Chen G. y Lou M. (1999), “Seismic effectiveness of tuned mass dampers considering soil-structure interaction”, Earthquake engineering and structural dynamics, No 28, pp. 1219-1233.